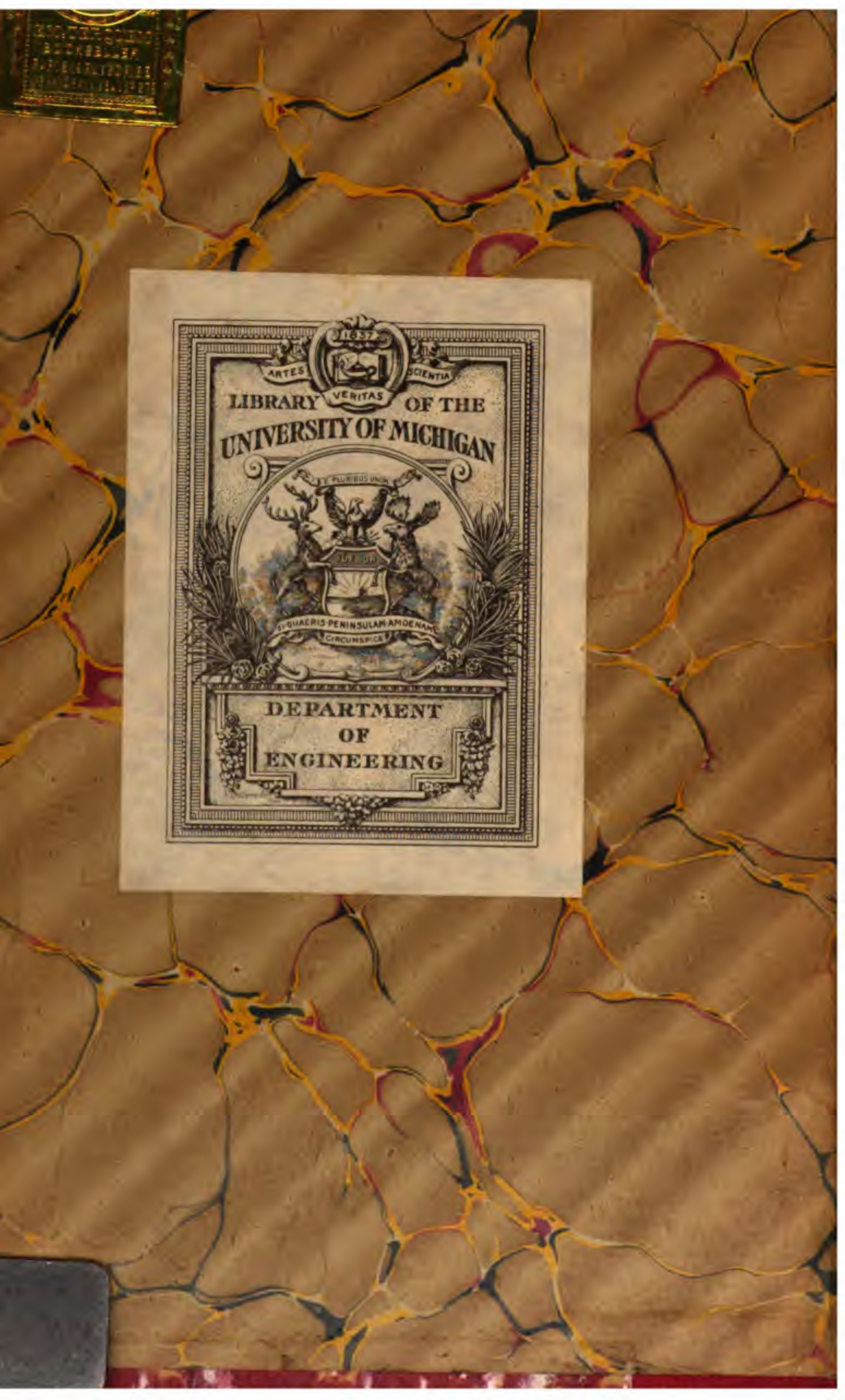
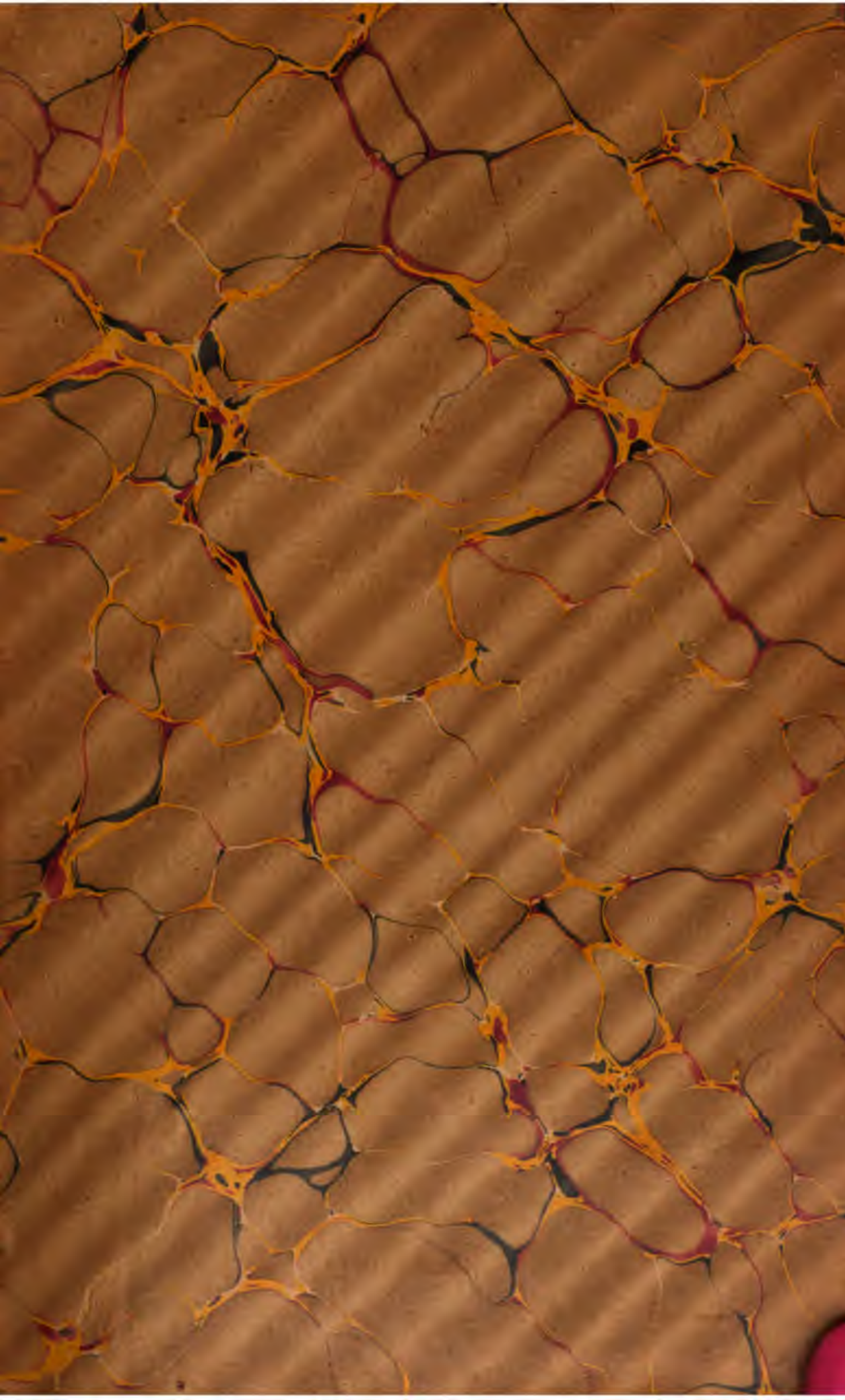

B 772,713



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING



LES

LAMPES A INCANDESCENCE

ÉLECTRIQUES,

Par J. RODET,

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1907

LES

LAMPES A INCANDESCENCE

ÉLECTRIQUES.

réaliser la *division de la lumière,* suivant l'expression consacrée à cette époque.

Ces efforts ont donné naissance tout d'abord aux lampes *à contact imparfait,* ou *à semi-incandescence.* Mais le fonctionnement de celles-ci était irrégulier. En outre, elles exigeaient une tension très faible qui obligeait à les monter en série en nombre assez grand pour que la section des conducteurs leur amenant le courant ne fût pas énorme. Pratiquement, elles ne possédaient donc pas la qualité primordiale de l'indépendance.

Ces divers défauts ont fait échouer ces lampes.

Les premières expériences réalisées avec le courant électrique avaient montré que celui-ci est capable de porter un fil de platine à l'incandescence. On a été conduit de la sorte, à une époque déjà lointaine, à construire une lampe avec hélice en fil de platine que l'on portait au blanc par le passage d'un courant. Malheureusement, le point de fusion de ce métal n'est pas assez élevé pour que le filament puisse fonctionner à une température suffisante pour assurer un rendement acceptable. En outre, la résistivité du platine, même à la température d'incandescence, est beaucoup trop faible pour permettre la fabrication de lampes de tensions usuelles.

On a construit aussi des lampes dans lesquelles l'organe lumineux était composé d'une tige de charbon de faible diamètre portée à l'incandescence par un courant électrique; mais elles avaient à peu près les mêmes défauts que les lampes à contact imparfait.

C'est le carbone, sous la forme d'un filament de très petite section, obtenu par carbonisation d'une fibre de bambou, d'un étroit ruban de papier ou d'un fil de coton, qui a permis de construire la première lampe à incandescence pratique.

Edison est l'un des inventeurs qui ont fait le plus dans cette voie, car non seulement il a réussi à créer une lampe à incandescence industrielle, mais encore il a étudié et fabriqué tous les accessoires d'une distribution électrique, sans parler des dynamos puissantes qu'il a construites pour desservir les importantes installations d'éclairage qu'il a entreprises dès que sa lampe a été établie.

Le carbone, possédant une grande résistivité et étant extrêmement réfractaire, a permis d'obtenir des filaments très résistants capables de fonctionner à une température assez haute pour que le rendement lumineux atteigne une valeur acceptable.

Un fait très important que l'on a constaté de bonne heure, c'est la grande utilité qu'il y a à maintenir le filament dans un vide aussi parfait que possible. Dans les premiers essais de construction de lampes à incandescence, on considérait que l'unique rôle du vide était de soustraire le filament à l'attaque de l'oxygène. Mais on découvrit bientôt qu'il avait encore une fonction extrêmement importante au point de vue du rendement lumineux : c'est de former un milieu non conducteur de la chaleur pour le filament incandescent.

La lumière étant constituée par des vibrations de l'éther représente de l'énergie.

Lorsqu'on cherche à se rendre compte du rendement lumineux des illuminants industriels, approximativement du moins, car on ne possède pas de base bien définie pour ces calculs, le phénomène physique étant compliqué par des considérations physiologiques, on est frappé de la faiblesse de l'utilisation de l'énergie disponible pour la production de la lumière.

Par exemple, dans l'éclairage au gaz, l'un des appareils les

plus perfectionnés à ce jour, le bec à manchon Auer, donne actuellement la carcel pour une consommation d'environ 12^{l} de gaz par heure, ou la bougie décimale pour $1^{l},25$. La combustion de $1^{l},25$ de gaz ayant un pouvoir calorifique de 5300 calories par mètre cube fournit 6,62 calories, ou 7,67 watts pendant 1 heure. En adoptant l'équivalent d'Angström, soit 0,102 watt par hefner sphérique, ou 0,1146 watt par bougie décimale sphérique, on trouverait pour le rendement du bec Auer, si son intensité lumineuse était constante dans toutes les directions, 1,4 pour 100. Comme la consommation horaire de 12^{l} se rapporte à l'intensité lumineuse horizontale, maximum, le rendement du bec Auer est, en réalité, inférieur à 1,4 pour 100.

D'autre part, nous verrons plus loin que le rendement lumineux des lampes à incandescence ordinaires est voisin de 2,5 pour 100.

Quoique le bec Auer n'utilise guère plus de 1 pour 100 de l'énergie qui lui est fournie, il produit un éclairage très économique grâce au bas prix de l'énergie qu'il consomme. En effet, le kilowatt-heure étant équivalent à 864 calories correspond à 163^{l} de gaz qui, à raison de $0^{fr},20$ le mètre cube, coûtent $0^{fr},0326$.

Dans l'éclairage électrique, le rendement lumineux a une importance beaucoup plus grande parce que le prix de l'énergie électrique est presque toujours élevé.

Un corps que l'on chauffe rayonne uniquement de la chaleur tant que sa température est inférieure à 525° C. Au-dessus de ce point, il émet simultanément des radiations calorifiques et des radiations lumineuses, puis des radiations ultra-violettes.

Si l'on accroît la température de ce corps, non seulement il rayonne une plus grande quantité d'énergie pendant l'unité

de temps, mais encore le rapport des radiations lumineuses aux radiations calorifiques augmente. Les radiations à onde courte croissent plus vite que celles à onde longue. Il en résulte qu'au fur et à mesure que la température du corps s'élève la lumière devient de moins en moins rouge, mais au contraire de plus en plus blanche, et que le rendement lumineux croît.

On a donc cherché à améliorer le rendement des lampes à incandescence en faisant fonctionner le filament à une température plus élevée. Mais ce procédé n'a donné que des résultats peu importants avec la lampe à filament de carbone, cette substance se détériorant rapidement à ces températures énormes.

On a encore observé que la nature de la surface du corps incandescent joue un rôle important. On a reconnu, en particulier, qu'un filament à surface lisse, brillante, possède des propriétés sélectives de longueurs d'onde, c'est-à-dire qu'il émet, pour une température donnée, une plus forte proportion de radiations à onde courte, visibles, que si sa surface était mate ou grossière.

Les métaux étant, en général, susceptibles de recevoir un beau poli, il était à présumer qu'ils devaient posséder à un haut degré ce pouvoir sélectif. Aussi quelques inventeurs ont-ils cherché à utiliser, pour la confection des filaments, des métaux extrêmement réfractaires, tels que l'osmium et le tantale, procurant simultanément les avantages d'une température considérable et de l'émission sélective.

D'autres recherches ont été dirigées vers des composés éminemment réfractaires, tels que les terres rares, et ont donné naissance à la lampe Nernst. Malheureusement le bénéfice procuré par la température excessivement élevée et les propriétés sélectives du bâtonnet est en grande partie

annihilé par la nécessité où l'on se trouve de faire fonctionner celui-ci non dans le vide, mais à l'air libre.

Toutes les substances expérimentées sont loin de pouvoir supporter la température énorme qu'exigerait un bon rendement. Jusqu'ici les lampes à filament solide les plus économiques, sanctionnées par la pratique, ont un rendement qui n'atteint même pas 5 pour 100. Il semble donc qu'il puisse y avoir encore un vaste champ pour les perfectionnements.

L'Ouvrage est divisé en sept Chapitres :

Le Chapitre I expose les principes généraux comprenant : des notions de photométrie; les quantités lumineuses; les étalons de lumière; la production de la lumière par la transformation de l'énergie électrique; le rendement lumineux; la variation de l'intensité lumineuse des lampes à incandescence avec la tension; la vie des lampes.

Le Chapitre II est un bref historique de la genèse des lampes à incandescence électriques. La plupart des documents contenus dans ce Chapitre sont empruntés aux Ouvrages suivants :

H. Fontaine. — Éclairage à l'électricité. 1879.

H. Vivarez. — Notions générales sur l'Éclairage électrique. 1886.

J. Zacharias. — Die Glühlampe. 1890.

The Electrical World and Engineer. 1904, 5 mars. — The beginnings of the incandescent lamp. Par Th. Edison.

Les Chapitres III, IV et V sont consacrés respectivement aux lampes à filament de carbone, d'osmium, de tantale.

Le Chapitre VI traite de la lampe Nernst.

Enfin le Chapitre VII est réservé à la lampe à vapeur de

mercure. Quoique la production de la lumière dans cet appareil semble être surtout un phénomène de luminescence, il m'a paru utile de la comprendre dans cette étude en raison de l'intérêt qu'elle présente au double point de vue théorique et pratique. Ce Chapitre se termine par l'exposé de l'utilisation de cet appareil comme redresseur de courant alternatif et de courant trpihasé.

Lyon, novembre 1906.

J. Rodet.

LES

LAMPES A INCANDESCENCE

ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE I.

PRINCIPES GÉNÉRAUX.

I. — NOTIONS DE PHOTOMÉTRIE.

1° *Quantités lumineuses. — Définitions.*

L'effet que produit un foyer lumineux sur une surface est ce qu'on appelle l'*éclairement*. L'unité d'éclairement est la *bougie-mètre* ou *lux;* c'est l'effet lumineux d'une bougie décimale à la distance de 1^m. Pour mesurer l'éclairement produit par une source lumineuse, on le comparera donc à celui que donne une bougie décimale placée à 1^m.

Imaginons un foyer lumineux ayant des dimensions assez petites pour qu'il puisse être considéré comme réduit à un point. Ce foyer émettra des rayons lumineux dans toutes les directions.

Si l'on considère l'ensemble des rayons lumineux compris dans un cône divergent ayant la source de lumière comme sommet, on voit qu'ils produisent sur une surface sphérique, tracée de ce même point comme centre, un *flux lumineux* ou *flux de lumière,* qui est constant dans le cône divergent, quel que soit le rayon de la sphère.

L'*intensité lumineuse* d'un foyer, suivant une direction, est le rapport du flux lumineux Φ_ω compris dans un cône ayant le foyer pour sommet et enveloppant cette direction à l'angle solide ω de ce cône.

En général, le foyer éclaire inégalement dans les diverses

directions. L'intensité lumineuse de la source, dans une direction quelconque, est alors égale au rapport du flux élémentaire $d\Phi$ compris dans un cône enveloppant la direction considérée à l'angle solide $d\omega$ de ce cône

$$B = \frac{d\Phi}{d\omega}. \tag{1}$$

L'intensité lumineuse moyenne du foyer est égale au flux total Φ_{tot} divisé par 4π :

$$B_{moy} = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi}. \tag{2}$$

Si le foyer éclaire également dans toutes les directions, la quantité ci-dessus est égale à l'intensité lumineuse B dans une direction quelconque.

Si l'intensité lumineuse d'un foyer dans une direction quelconque est B, le flux lumineux $d\Phi$, dans un cône élémentaire suivant cette direction et dont l'angle solide est $d\omega$, a pour valeur

$$d\Phi = B\, d\omega \tag{3}$$

et le flux total de lumière émis par le foyer est

$$\Phi_{tot} = \int B\, d\omega. \tag{4}$$

Si l'intensité lumineuse du foyer est la même dans toutes les directions et égale à B, on a

$$\Phi_{tot} = B \int d\omega = 4\pi B. \tag{5}$$

Soient α l'angle d'incidence d'un rayon d'intensité lumineuse B sur un élément dS de la surface S frappée par le flux, et D la distance de cet élément de surface à la source. Le flux lumineux traversant normalement l'unité de surface située à l'unité de distance étant B, le flux lumineux traversant normalement l'unité de surface à la distance D est $\frac{B}{D^2}$. D'autre part, la projection de la surface dS sur un plan perpendiculaire à la direction considérée est égale à $dS \cos\alpha$.

Le flux de lumière Φ frappant la surface S est donc

$$\Phi = \int \frac{B}{D^2} dS \cos\alpha. \tag{6}$$

On appelle *éclairement* en un point d'une surface frappée par le flux lumineux le rapport du flux $d\Phi$ qui tombe sur un élément dS de la surface en ce point à l'aire dS de cet élément

$$e = \frac{d\Phi}{dS}. \tag{7}$$

Considérons les éclairements e_1 et e_2 en deux points situés à des distances D_1 et D_2 d'un foyer punctiforme, suivant une même direction. Si l'on appelle $d\omega$ l'angle solide d'un petit cône suivant la direction considérée, les surfaces découpées dans ce cône par les deux sphères de rayons D_1 et D_2 ont respectivement pour valeur $D_1^2\, d\omega$ et $D_2^2\, d\omega$.

Le flux lumineux $d\Phi$ étant constant dans le cône, les éclairements aux deux points considérés sont donc

$$e_1 = \frac{d\Phi}{D_1^2\, d\omega} \tag{8}$$

et

$$e_2 = \frac{d\Phi}{D_2^2\, d\omega}. \tag{9}$$

Par suite, on a

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}. \tag{10}$$

C'est-à-dire que l'éclairement en un point suivant une direction est en raison inverse du carré de la distance de ce point au foyer punctiforme.

L'éclairement moyen e_{moy} d'une sphère de rayon R au centre de laquelle se trouve un foyer punctiforme émettant un flux total Φ_{tot} est

$$e_{moy} = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi R^2} = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi} \frac{1}{R^2}. \tag{11}$$

La quantité $\frac{\Phi_{tot}}{4\pi}$ étant l'intensité moyenne du foyer, on peut écrire

$$(12) \qquad e_{moy} = \frac{B_{moy}}{R^2}.$$

Si l'intensité lumineuse du foyer est constante dans toutes les directions et égale à B, l'éclairement est lui-même constant sur toute la surface intérieure de la sphère et égal à

$$(13) \qquad e = \frac{B}{R^2}.$$

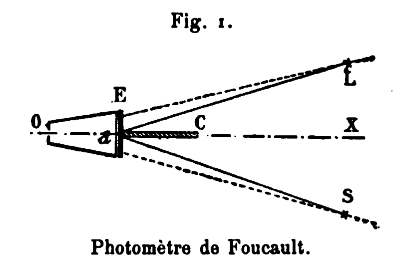
L'éclairement e' d'un élément de surface oblique, frappé par le flux lumineux sous un angle d'incidence α, est

$$(14) \qquad e' = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{B\cos\alpha}{R^2}.$$

La plupart des méthodes photométriques sont basées sur la loi du carré des distances et sur l'égalisation de l'éclairement de deux surfaces par les deux foyers que l'on veut comparer et dont l'un est l'étalon.

Photomètre de Foucault. — Les deux foyers L et S (*fig.* 1) sont placés en arrière d'un écran vertical E en verre laiteux

Fig. 1.



Photomètre de Foucault.

ou dépoli, de part et d'autre d'une cloison opaque C perpendiculaire à l'écran E, de manière qu'ils projettent leurs rayons sur le milieu de l'écran suivant des angles égaux XdL, XdS. On observe les deux plages à travers un tube conique muni d'un orifice oculaire O de dimensions juste suffisantes pour qu'on puisse y appliquer un seul œil. Les éclairements des

deux plages sont ainsi mieux jugés avec le même organe placé d'ailleurs à la distance de $0^m,30$ déterminée par la longueur du tube et la plus favorable pour l'observation nette de l'écran.

On place la lampe étalon S à une distance fixe, de 1^m par exemple, puis l'on déplace la lampe L à mesurer suivant la direction dL en la rapprochant ou en l'éloignant de l'écran E jusqu'à ce que les éclairements des deux plages soient égaux. L'éclairement de chaque plage étant proportionnel à l'intensité B_L ou B_S du foyer qui le produit, et inversement proportionnel au carré de la distance dL ou dS et les deux éclairements étant égaux, on a

$$(15) \qquad \frac{B_L}{\overline{dL}^2} = \frac{B_S}{\overline{dS}^2}$$

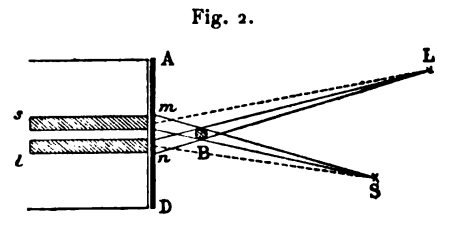
et, par suite,

$$(16) \qquad B_L = B_S \frac{\overline{dL}^2}{\overline{dS}^2}.$$

Photomètre de Rumford. — La méthode photométrique de Rumford est basée sur l'égalité d'intensité de deux ombres projetées sur un écran blanc, opaque, respectivement par les deux foyers à comparer.

AD (*fig.* 2) est l'écran vertical et B la baguette opaque

Fig. 2.



Photomètre de Rumford.

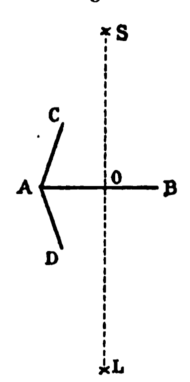
projetant deux ombres (rabattues en *l* et *s*) sur l'écran. L'ombre *l* est éclairée par la source S et l'ombre *s* par la source L. La baguette B étant placée à une très faible distance de l'écran AD, on peut aisément disposer les foyer L et S, de manière que les ombres viennent se toucher par leur bord intérieur, afin de rendre leur comparaison plus facile. On

rapproche ou l'on éloigne L de l'écran, de façon que les deux ombres aient la même intensité. Les éclairements produits par les deux foyers sont alors égaux et l'on applique la loi du carré des distances mL et nS.

Photomètre de Bunsen. — Cet appareil est basé sur la différence des propriétés lumineuses d'une feuille de papier blanc et d'une tache de matière grasse sur cette feuille, au point de vue de la réflexion et de la transparence.

Ainsi un observateur regardant la face du papier éclairée par transparence par le foyer placé derrière la feuille verra la tache brillante au milieu du fond sombre du papier. Si l'on reporte le foyer du côté de l'observateur, la tache paraîtra sombre sur le fond clair du papier. Lorsque la feuille est éclairée également par les deux sources de lumière à comparer, le flux lumineux émis par l'unité de surface de l'une quelconque des deux faces de la tache étant égal à la somme du flux qu'il réfléchit et du flux qu'il laisse passer par transparence, est égal au flux lumineux réfléchi par l'unité de surface du papier opaque et la tache disparaît.

Fig. 3.



Photomètre de Bunsen.

La feuille de papier AB est placée verticalement sur le banc du photomètre et perpendiculairement à la ligne SL des foyers lumineux. Comme les deux faces du papier peuvent ne pas être identiques, il convient d'observer la tache sur les deux faces de manière à obtenir, par le déplacement des foyers, sinon la disparition simultanée de la tache des deux côtés, du

moins l'égalité d'apparence lumineuse. A cet effet, deux miroirs AC, AD, faisant entre eux un angle de 140°, permettent à l'observateur, regardant dans la direction BA, d'apercevoir simultanément l'image des deux faces du papier et deux taches qu'il peut de la sorte aisément comparer.

Les sources lumineuses usuelles ne sont pas punctiformes et l'on appelle *éclat intrinsèque* d'un foyer le rapport de l'intensité lumineuse mesurée normalement au foyer à l'aire de la surface d'émission de celui-ci. B désignant l'intensité suivant la normale d'une surface lumineuse S, l'éclat intrinsèque ε de cette dernière est

$$\varepsilon = \frac{B}{S}. \tag{17}$$

Si nous observons une surface lumineuse sous un certain angle, le flux lumineux reçu par notre œil est plus petit que si le rayon visuel était normal à la paroi, puisque la surface d'émission apparente est moindre. L'intensité lumineuse par unité de surface d'une paroi lumineuse dans une direction faisant un angle α avec la normale est $\frac{B}{S}\cos\alpha = \varepsilon\cos\alpha$.

Un globe lumineux offre l'apparence d'un disque uniformément éclairé sur toute sa surface. Ce phénomène s'explique aisément par la remarque précédente. En effet, le flux lumineux rayonné vers l'œil de l'observateur par chaque élément de surface du globe est le même que celui qu'émettrait la projection de l'élément sur un plan normal au rayon visuel, projection ayant le même éclat intrinsèque que l'élément considéré.

Il n'existe pas de différence essentielle entre la notion de l'éclat intrinsèque et celle de l'éclairement. Par rapport à l'œil l'éclairement d'une surface est l'éclat intrinsèque de celle-ci devenue lumineuse par transparence ou par réflexion.

La *quantité de lumière* fournie à un objet est égale au produit du flux lumineux qui frappe cet objet par la durée de l'éclairage

$$Q = \Phi t. \tag{18}$$

On appelle *illuminant* une substance renfermant de l'énergie ou de l'énergie même, sous une forme telle que cette énergie peut être transformée, au moins partiellement, dans des appareils appropriés appelés *lampes,* en énergie lumineuse. L'acide stéarique, la paraffine, l'huile de colza, le pétrole, le gaz d'éclairage, l'acétylène, l'électricité sont des illuminants.

L'*incandescence* est l'état d'un corps porté à une température telle que ses radiations calorifiques sont accompagnées de radiations lumineuses.

La *luminescence* est la transformation directe en énergie lumineuse de l'énergie sous une forme différente.

2° *Étalons de lumière. — Unités.*

On mesure l'intensité lumineuse d'un foyer en le comparant à un autre foyer choisi comme unité et appelé *étalon de lumière.*

Les divers pays ont adopté différents étalons de lumière. Ceux actuellement en usage sont indiqués dans le Tableau suivant.

ÉTALON.	VIOLLE.	CARCEL.	BOUGIE décimale.	BOUGIE Hefner.	CANDLE.
Violle	1	2,080	20	22,46	19,8
Carcel	0,481	1	9,62	10,8	9,5
Bougie décimale	0,050	0,104	1	1,123	0,99
Bougie Hefner	0,0445	0,0926	0,89	1	0,88
Candle	0,0505	0,105	1,01	1,136	1

Étalon Violle. — La Conférence internationale des Électriciens, en 1884, a adopté l'étalon de lumière proposé par M. Violle. Cette unité d'intensité lumineuse est celle produite par l'émission normale des radiations de 1^{cm^2} de platine fondu, à la température de solidification. Cet étalon vaut 2,080 carcels. Il est coûteux et d'un maniement délicat. Il sert uniquement d'étalon prototype destiné au tarage des étalons secondaires utilisés dans les mesures courantes.

Lampe Carcel. — C'est une lampe à huile à double courant d'air, imaginée en 1800 par Carcel et adoptée plus tard par Dumas et Regnault comme étalon de photomètre. L'alimentation en huile est assurée par deux petites pompes actionnées par un mouvement d'horlogerie. Elle est portée par l'une des extrémités d'un fléau de balance qui permet de peser la quantité d'huile brûlée. Les dimensions principales sont les suivantes :

	mm
Diamètre extérieur du bec........................	23,5
Diamètre du courant d'air extérieur................	45,5
Diamètre du courant d'air intérieur................	17
Diamètre intérieur du verre au sommet.............	30
Diamètre extérieur du verre au niveau du coude.....	47
Épaisseur moyenne du verre......................	2
Hauteur totale du verre..........................	290
Distance du coude à la base du verre...............	61
Hauteur de la mèche au-dessus du bec............	10
Hauteur du coude au-dessus du niveau de la mèche..	7
Hauteur de la flamme............................	40

Cette lampe donne 1 carcel lorsqu'elle brûle 42g d'huile de colza à l'heure. On tolère un écart de consommation d'huile de 4g en plus ou en moins et l'on admet que, entre ces limites, l'intensité lumineuse est proportionnelle à la quantité d'huile brûlée par heure, P grammes,

$$B = \frac{P}{42} \text{ carcels.}$$

Les résultats donnés par divers étalons Carcel peuvent différer de 2 à 3 pour 100 entre eux.

On emploie aussi le bec Bengel, qui est une modification du bec Argand, à flamme annulaire, à double courant d'air, donnant 1 carcel pour une consommation horaire de 105l de gaz.

Bougie décimale. — C'est, par définition, le vingtième de l'étalon Violle. Elle est un peu supérieure au dixième de la Carcel. On donne aussi à cette unité le nom de *pyr*.

Lampe Hefner-Alteneck. — C'est une lampe brûlant de l'acétate d'amyle, dont le point d'ébullition est très constant

et voisin de 138° C. Le tube de la mèche a 8^{mm} de diamètre et la hauteur de la flamme est réglée exactement à 40^{mm}. Une différence de hauteur de 1^{mm} produit une variation d'intensité lumineuse de 3 pour 100. C'est l'étalon adopté en Allemagne.

Bougie anglaise ou Candle. — C'est une bougie de spermaceti ou blanc de baleine. Six pièces pèsent 1 livre anglaise de 453^{g}. Elle brûle $7^{g},76$ de matière à l'heure en donnant une flamme de 44^{mm} de longueur. On emploie aussi la lampe au pentane valant 10 *candles nominales.* D'après les recherches récentes de la *Reichsanstalt,* de Berlin, cet étalon équivaut à 11 hefners. La candle anglaise nominale vaudrait donc 1,1 hefner et serait inférieure d'environ 3 pour 100 à la candle de spermaceti.

On avait adopté autrefois :

La *bougie de l'Étoile*, d'acide stéarique, de 5 au paquet de 465^{g}, brûlant $9^{g},60$ à l'heure. Elle équivaut à 0,062 violle ou à 0,130 carcel;

La bougie allemande de paraffine, ou *Vereinkerze,* de 20^{mm} de diamètre, à mèche de 24 brins. 12 pièces pèsent 1^{kg}. Elle donne une flamme de 50^{mm} de hauteur et vaut 0,061 violle et 0,127 carcel.

Tous les étalons à flamme doivent naturellement brûler dans un air pur et calme.

M. Blondel a donné le nom de *lumen* à l'unité pratique de flux lumineux, ou flux produit par une bougie-décimale ou pyr dans un angle solide égal à l'unité. Un foyer punctiforme de 1 bougie-décimale rayonne uniformément un flux total de 4π lumens.

L'unité pratique d'éclairement est la *bougie-mètre* ou *lux*. C'est l'éclairement fourni par 1 bougie-décimale sur une surface normale aux rayons lumineux et placée à 1^{m} de distance.

L'unité pratique d'éclat intrinsèque est la *bougie-décimale par centimètre carré* ou le *pyr par centimètre carré.*

L'unité pratique de quantité de lumière est le *lumen-heure*.

II. — Éclat intrinsèque de quelques sources lumineuses.

L'éclat intrinsèque ε d'un foyer a été défini comme étant le rapport de l'intensité lumineuse mesurée normalement au

foyer à l'aire de la surface d'émission de celui-ci :

$$\varepsilon = \frac{B}{S} \text{ bougies par centimètre carré,}$$

B étant l'intensité lumineuse en bougies-décimales normalement à la surface lumineuse S exprimée en centimètres carrés.

Cette définition suppose la surface d'émission plane, et la détermination de l'intensité lumineuse ne peut être faite qu'en des points de l'espace situés à une distance du foyer suffisamment grande par rapport aux dimensions de la surface rayonnante pour que la droite joignant le point où se fait la mesure à l'un quelconque des points de la surface puisse être considérée comme une normale.

Une source lumineuse de 1 centimètre carré et ayant un éclat intrinsèque de 1 bougie-décimale par centimètre carré donnera, sur une surface parallèle à celle de la source, au point où la normale au foyer perce l'écran (l'œil par exemple), le même éclairement que 1 bougie-décimale, ou pyr, substituée à la source considérée. Si le foyer a S centimètres carrés et un éclat intrinsèque de ε pyrs par centimètre carré, l'éclairement sera εS fois celui produit par 1 bougie-décimale.

L'éclat intrinsèque d'un bain de platine à la température de solidification est égal à 20 bougies-décimales par centimètre carré.

Nous avons trouvé pour le filament d'une lampe de 32 bougies, consommant 0,9 ampère à 110 volts, un diamètre de $0^{mm},18$ et une longueur de 250^{mm}. Si nous admettons que l'intensité lumineuse de 32 bougies est mesurée suivant l'axe de l'hélice du filament, l'éclat intrinsèque de celui-ci est

$$\frac{32}{0{,}0018 \times 250} = 71 \text{ bougies par centimètre carré.}$$

$1^{mm^2},4$ de surface développée du filament donnerait donc, dans une direction normale, une intensité lumineuse de 1 bougie.

On indique quelquefois le nombre de millimètres carrés de surface totale du filament par bougie-décimale horizontale. On a dans le cas actuel

$$\frac{3{,}14 \times 0{,}18 \times 250}{32} = 4^{mm^2},42 \text{ par bougie horizontale.}$$

Une lampe à l'osmium de 25 hefners horizontaux ou 22,25 bougies-décimales horizontales à 37 volts, consommant 37,5 watts, a un filament de $0^{mm},087$ de diamètre et de 280^{mm} de longueur. Le filament se compose de trois éléments en forme de V. Son éclat intrinsèque est

$$\frac{22,25}{0,00087 \times 280} = 91,4 \text{ bougies par centimètre carré.}$$

La surface rayonnante par bougie horizontale est

$$\frac{3,14 \times 0,087 \times 280}{22,25} = 3^{mm^2},44 \text{ par bougie horizontale.}$$

Une lampe au tantale Siemens et Halske de 25 hefners horizontaux, ou 22,25 bougies-décimales horizontales, à 110 volts, absorbant 41 watts, a un filament de $0^{mm},05$ de diamètre et de 650^{mm} de longueur. Son éclat intrinsèque est

$$\frac{22,25}{0,0005 \times 650} = 68,5 \text{ bougies par centimètre carré.}$$

En réalité, l'éclat intrinsèque doit être un peu supérieur à ce nombre, car une partie notable du filament a la forme d'arc, et, en outre, le système de support constitue un écran partiel pour une partie du flux lumineux rayonné dans une direction horizontale quelconque.

L'éclat intrinsèque du bâtonnet de la lampe Nernst est d'environ 300 bougies par centimètre carré.

L'éclat intrinsèque de la lampe à vapeur de mercure Cooper Hewitt est très faible, environ 3 ou 4 bougies par centimètre carré.

III. — Intensité lumineuse d'une lampe.

1° *Intensités lumineuses horizontale, hémisphérique et sphérique.*

Nous avons défini l'intensité lumineuse d'un foyer comme étant le rapport d'un flux de lumière à l'angle solide qui l'enserre, et nous avons vu que l'on mesure cette intensité lumineuse en la comparant à celle d'un autre foyer choisi comme unité ou étalon.

Comme, en général, un foyer éclaire inégalement dans les diverses directions, c'est-à-dire qu'il a des intensités lumineuses différentes suivant les diverses directions, la comparaison de ce foyer avec l'étalon peut se faire de plusieurs manières. Par exemple, on mesurera l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence dans un plan horizontal, perpendiculaire à l'axe de la lampe, et passant par le milieu du filament. Si l'intensité lumineuse n'est pas la même suivant toutes les directions dans ce plan, on pourra mesurer l'intensité suivant certaines directions convenablement choisies, et en prendre la moyenne. On obtiendra ainsi l'*intensité lumineuse horizontale moyenne,* ou simplement, par abréviation, l'*intensité lumineuse horizontale.* Cette valeur peut être déterminée par une mesure unique si l'on donne à la lampe un mouvement de rotation autour de son axe. La vitesse que l'on adopte d'ordinaire est de 180 tours par minute.

C'est en général par l'intensité lumineuse horizontale que l'on définit la puissance lumineuse des lampes à filament de carbone, d'osmium, de tantale.

Dans d'autres cas, on considère que l'effet le plus utile produit par une lampe est celui dû au flux lumineux qu'elle émet au-dessous du plan horizontal, perpendiculaire à l'axe et passant par le milieu du filament, et l'on est ainsi amené à mesurer l'*intensité lumineuse hémisphérique inférieure moyenne.*

La plupart des fabricants de lampes indiquent pour l'intensité lumineuse la quantité qui est la plus favorable à leurs produits : pour les lampes à filament de carbone, d'osmium et de tantale, c'est l'intensité lumineuse horizontale qui est indiquée; pour la lampe Nernst on adopte l'intensité lumineuse hémisphérique inférieure moyenne, ou encore l'intensité lumineuse suivant l'axe.

Cependant, la quantité la plus importante est l'*intensité lumineuse sphérique moyenne.* C'est elle qui permet de calculer le flux lumineux total. Le rendement lumineux est mesuré par le flux lumineux total produit par watt dépensé, la lampe étant nue. Ce flux peut être réparti à volonté à l'aide d'un dispositif approprié : réflecteur, abat-jour, globe, etc.

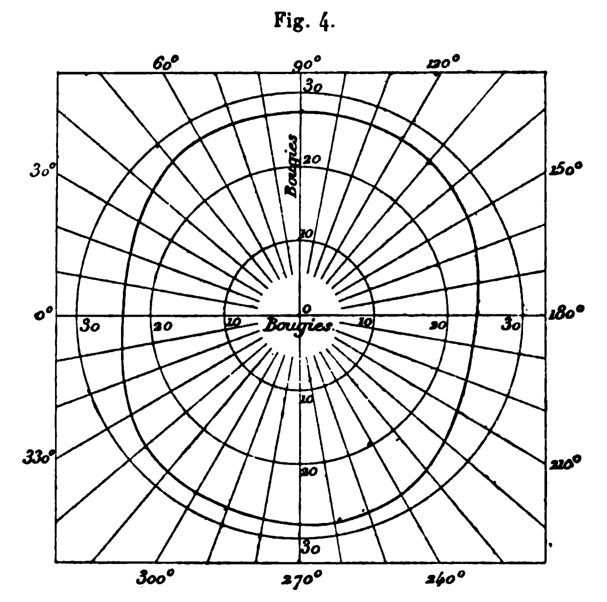
M. Fleming estime que la seule comparaison scientifique

des diverses sources de lumière est celle de leurs flux lumineux totaux. Il cite le cas d'une lampe Nernst et d'une lampe à filament de carbone. En considérant l'intensité lumineuse hémisphérique moyenne pour la lampe Nernst et l'intensité lumineuse horizontale moyenne pour la lampe à filament de carbone, on trouvait pour la première un rendement lumineux double de celui de la seconde, tandis qu'en comptant les flux lumineux totaux par watt, la lampe Nernst avait un rendement supérieur de 25 pour 100 seulement à celui de la lampe ordinaire.

2° *Distribution du flux lumineux.*

La figure 4 indique la distribution du flux lumineux pour une lampe à filament de carbone, d'intensité lumineuse

Fig. 4.



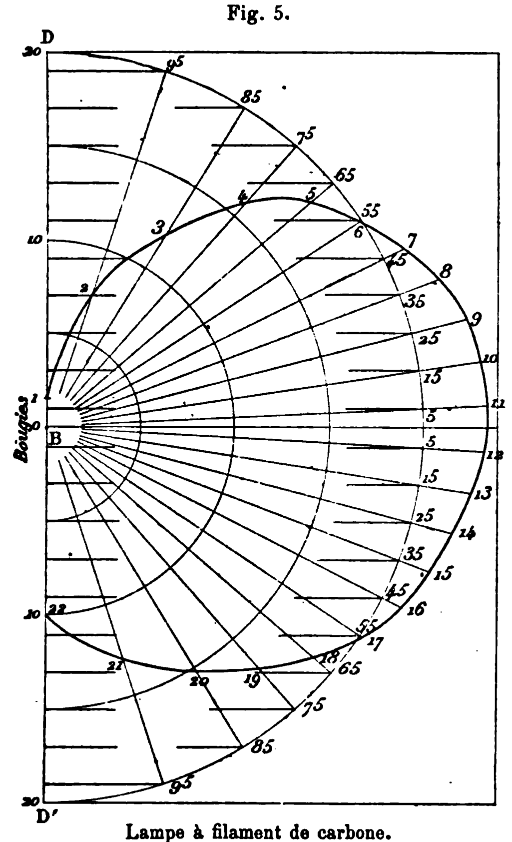
Lampe à filament de carbone.
Distribution horizontale de la lumière.

horizontale nominale de 25 bougies, dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'ampoule et passant par le milieu du filament. La courbe de distribution horizontale du flux

diffère d'un cercle en raison de la forme asymétrique du filament.

La figure 5 représente la distribution du flux lumineux, pour la même lampe, dans un plan vertical, c'est-à-dire dans

Fig. 5.



Lampe à filament de carbone.
Distribution de la lumière dans un plan méridien.

un plan passant par l'axe de l'ampoule, et d'un seul côté de cet axe. L'intensité lumineuse, sensiblement nulle dans la direction du culot, est d'environ 23,5 bougies dans la direction horizontale, et tombe à 10 bougies suivant la pointe.

La figure 6 représente l'intensité lumineuse dans un plan vertical, des deux côtés de l'axe, pour une lampe Siemens et Halske à filament de tantale, de 25 hefners horizontaux,

à 110 volts. En raison de la disposition symétrique du filament par rapport à l'axe, la distribution horizontale du flux lumineux est uniforme.

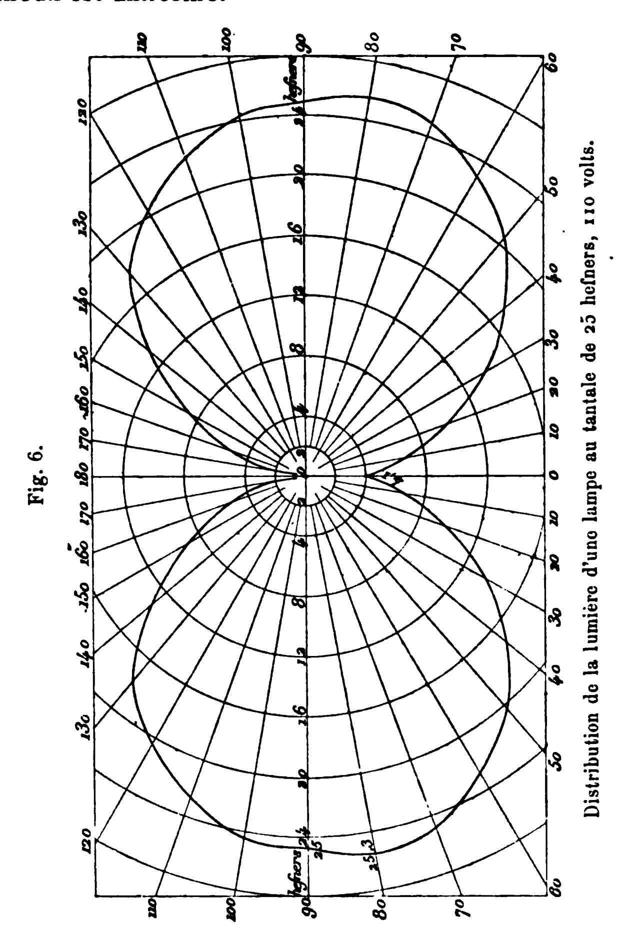


Fig. 6.

Distribution de la lumière d'une lampe au tantale de 25 hefners, 110 volts.

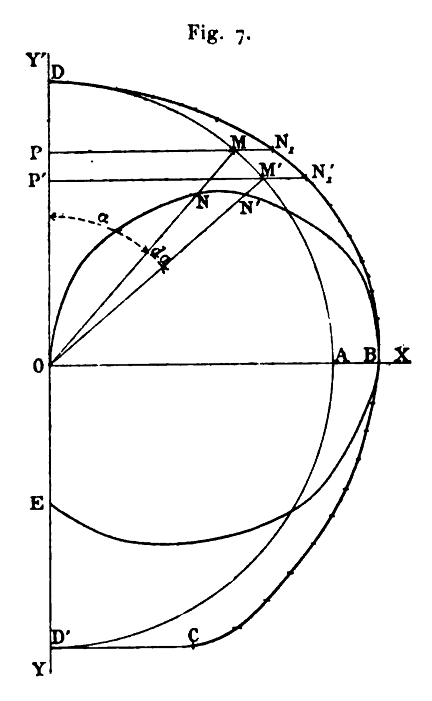
3° *Facteur de conversion sphérique.*

On appelle *facteur de conversion sphérique* d'une lampe le rapport de son intensité lumineuse sphérique moyenne à son intensité lumineuse horizontale. C'est le nombre par lequel il faut multiplier l'intensité lumineuse horizontale pour obtenir la valeur de l'intensité lumineuse sphérique moyenne.

Nous allons examiner diverses méthodes permettant de déterminer ce facteur.

Diagramme de Rousseau. — Soit ONBE (*fig.* 7) la courbe d'intensité lumineuse dans un plan vertical pour une lampe

Fig. 7.



à incandescence ayant l'axe de l'ampoule vertical, la pointe tournée vers le bas. L'ordonnée polaire ON de cette courbe représente la moyenne des intensités lumineuses suivant les génératrices d'un cône de révolution ayant OY' pour axe et $Y'ON = \alpha$ comme demi-angle au sommet.

Considérons la sphère de rayon OA égale à l'unité de longueur, soit 1^m, et ayant O comme centre. Le flux lumineux coupant normalement la zone engendrée par l'arc élémentaire MM' tournant autour de YY' est

$$\begin{aligned} d\Phi_\alpha &= \text{ON}\, 2\pi\, \text{PM}.\text{MM}' \\ &= 2\pi\, \text{ON} \sin\alpha\, d\alpha \\ &= 2\pi\, \text{ON}.\text{PP}'. \end{aligned}$$

Le flux lumineux traversant normalement la zone MM′ est donc égal à 2π multiplié par le produit de l'intensité lumineuse dans la direction ON et de la projection PP′ de l'arc MM′ sur l'axe YY′, c'est-à-dire que si l'on porte $PN_1 = ON$ et $P'N'_1 = ON'$, ce flux élémentaire est égal à 2π fois l'aire $PN_1N'_1P'P$. La courbe DN_1BC étant le lieu du point N_1, le flux lumineux total émis par la lampe est donc égal à l'aire $DN_1BCD'D$ multipliée par 2π.

Dans la figure 5 O est le point de l'axe de l'ampoule pour lequel l'intensité lumineuse normale à cette droite est maximum. Portons de part et d'autre du point O les longueurs OD, OD′ égales à 100^{mm}, puis aux points situés à 5-15-25-35-...-85-95-...-195^{mm} de D élevons des perpendiculaires à l'axe, et par les points où ces droites coupent la demi-circonférence tracée sur DD′ comme diamètre menons les rayons de ce demi-cercle. A chaque point de division de l'axe portons en ordonnée l'intensité lumineuse mesurée suivant le rayon passant par l'intersection de la demi-circonférence DD′ et de l'ordonnée en question. Par exemple nous portons (*fig.* 7) $PN_1 = ON$. En reliant les divers points ainsi déterminés nous obtenons une courbe DBC (*fig.* 7) telle que l'aire DBCD′D représente, au facteur 2π près, le flux lumineux total rayonné par la lampe. Pour obtenir l'intensité lumineuse sphérique moyenne, il suffit, eu égard à la division particulière de l'axe DD′, de prendre la moyenne des intensités lumineuses O2, O3, ..., O21, (*fig.* 5), c'est-à-dire d'additionner toutes ces quantités et de diviser la somme par leur nombre.

Si l'on désirait avoir l'intensité lumineuse hémisphérique moyenne soit inférieure, soit supérieure, on prendrait la moyenne des intensités lumineuses respectivement dans le quadrant inférieur ou dans le quadrant supérieur.

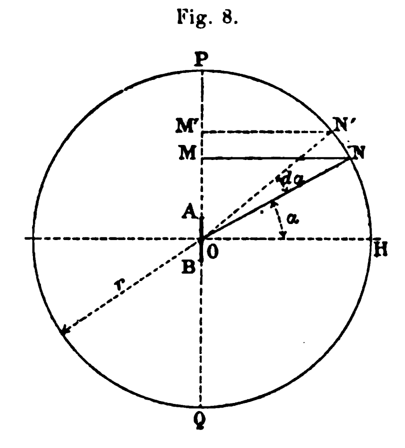
Étude de M. J.-A. Fleming. — Comme c'est l'intensité lumineuse horizontale moyenne qui est indiquée pour la plupart des lampes à incandescence, il serait utile d'avoir une formule simple qui permît de déduire de l'intensité indiquée l'intensité lumineuse sphérique moyenne.

M. Dyke a trouvé dans les expériences qu'il a effectuées au *Pender Electrical Laboratory*, de Londres, que le rapport de

l'intensité lumineuse sphérique moyenne d'une lampe à incandescence à son intensité lumineuse horizontale moyenne était égal à environ 0,78 pour neuf types différents de lampes. Pour obtenir l'intensité lumineuse horizontale moyenne, il employait la méthode ordinaire consistant à donner à la lampe un mouvement de rotation autour de son axe.

M. Fleming a démontré de la façon suivante que ce résultat n'est pas accidentel :

Fig. 8.



Considérons un filament rectiligne AB (*fig.* 8) incandescent et placé au centre O d'une sphère de rayon r suffisamment grand pour que les dimensions du filament soient négligeables par rapport à ce rayon.

Soient :

B_H l'intensité lumineuse horizontale suivant OH;
B_α l'intensité lumineuse dans une direction ON quelconque faisant un angle α avec l'horizontale;
B_S l'intensité lumineuse sphérique moyenne.

Si l'on observe un filament rectiligne incandescent à travers une petite fenêtre rectangulaire pratiquée dans un écran métallique, et si l'on donne à ce filament diverses inclinaisons par rapport à l'écran, on ne constate, entre certaines limites, pas de différence sensible entre les flux lumineux qui traversent la petite fenêtre rectangulaire pour ces diverses inclinaisons. On conclut de cette observation que l'intensité lumi-

neuse d'un filament de faible longueur suivant une direction est proportionnelle à la projection de ce filament sur un plan perpendiculaire à la direction considérée. On a, par conséquent,

$$(1)\qquad B_\alpha = B_H \cos\alpha.$$

L'aire de la zone sphérique engendrée par l'arc élémentaire $NN' = r\,d\alpha$ est

$$(2)\qquad \begin{cases} dS = 2\pi r \cos\alpha \, r\,d\alpha \\ \quad\;\; = 2\pi r^2 \cos\alpha\, d\alpha. \end{cases}$$

Le flux lumineux coupant l'unité de surface de la sphère de rayon 1, suivant la direction ON, est

$$B_H \cos\alpha.$$

Le flux lumineux suivant cette même direction, tombant sur l'unité de surface de la sphère de rayon r, est donc

$$\frac{B_H \cos\alpha}{r^2}.$$

Par suite, la zone considérée reçoit un flux lumineux

$$(3)\qquad \begin{cases} d\Phi = \dfrac{B_H \cos\alpha}{r^2} 2\pi r^2 \cos\alpha\, d\alpha \\ \quad\;\; = 2\pi B_H \cos^2\alpha\, d\alpha. \end{cases}$$

Le flux lumineux total tombant sur la surface intérieure de la sphère a donc pour expression

$$(4)\qquad \Phi = 2\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} 2\pi B_H \cos^2\alpha\, d\alpha.$$

D'autre part, ce flux lumineux total est encore égal, par définition, au produit de l'intensité lumineuse sphérique moyenne B_S par la surface de la sphère de rayon 1, c'est-à-dire qu'on a

$$(5)\qquad \Phi = 4\pi B_S.$$

On peut donc écrire

(6) $$4\pi B_S = 4\pi B_H \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2\alpha \, d\alpha$$

ou

(7) $$B_S = B_H \frac{\pi}{4}.$$

On a donc

(8) $$\frac{B_S}{B_H} = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

Le rapport $\frac{B_S}{B_H}$, ou facteur de conversion sphérique, est donc, dans le cas d'un filament rectiligne de longueur faible par rapport à la distance à laquelle on mesure les intensités, égal à 0,785, nombre sensiblement le même que celui trouvé expérimentalement par M. Dyke pour neuf types différents de lampes à incandescence.

M. Fleming a fait un calcul analogue pour un filament rectiligne dont la longueur n'est pas négligeable vis-à-vis du rayon r, ainsi que pour des filaments de formes diverses : en U, en boucle simple ou multiple. Il conclut de ses calculs que le facteur 0,785 est applicable en général aux lampes à incandescence.

Coefficients de conversion partiels. — Lorsqu'on a déterminé les valeurs de l'intensité lumineuse d'une lampe suivant une série de directions, comme pour la construction du diagramme de Rousseau, on peut trouver l'intensité lumineuse sphérique moyenne à l'aide d'un calcul très simple.

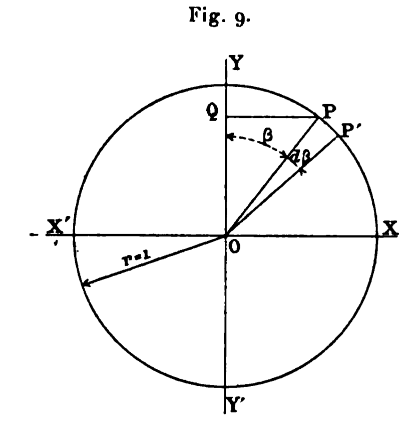
Soit YY' (*fig.* 9) l'axe de l'ampoule d'une lampe à incandescence dont la pointe est dirigée vers Y'. Appelons B_β l'intensité lumineuse moyenne suivant les directions faisant un angle $YOP = \beta$ avec l'axe YY'. Le flux lumineux dans l'espace compris entre deux cônes ayant YY' comme axe et respectivement comme demi-angle au sommet β et $\beta + d\beta$, flux qui coupe normalement la zone engendrée par la rotation de l'arc élémentaire PP' autour de YY', le rayon de la sphère étant égal à l'unité, est

(1) $$d\Phi = B_\beta \, 2\pi \sin\beta \, d\beta.$$

Le flux lumineux compris entre deux cônes ayant respectivement comme demi-angle au sommet β_1 et β_2 a donc pour expression

$$(2) \qquad \Phi_{\beta_2-\beta_1} = 2\pi \int_{\beta=\beta_1}^{\beta=\beta_2} B_\beta \sin\beta \, d\beta,$$

Fig. 9.



et le flux lumineux total émis par la lampe a pour valeur

$$(3) \qquad \Phi = 2\pi \int_{\beta=0}^{\beta=\pi} B_\beta \sin\beta \, d\beta.$$

Si nous divisons la sphère de rayon 1 en zones interceptant des angles $\beta_2 - \beta_1$ assez petits pour que l'intensité lumineuse B_β puisse être considérée comme pratiquement constante sur toute la longueur de l'arc $\beta_2 - \beta_1$, la relation (2) pourra s'écrire

$$(4) \qquad \left\{ \begin{aligned} \Phi_{\beta_2-\beta_1} &= 2\pi B_\beta \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin\beta \, d\beta \\ &= B_\beta \, 2\pi(\cos\beta_1 - \cos\beta_2). \end{aligned} \right.$$

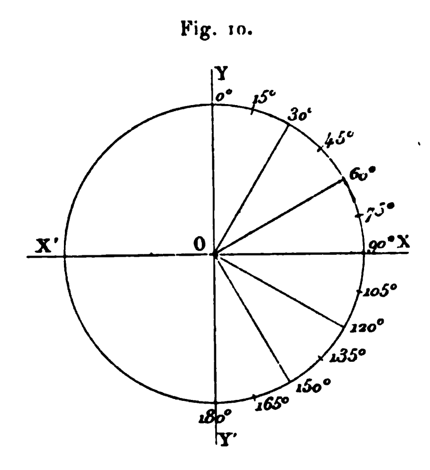
Le facteur $2\pi(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)$ représente l'aire de la zone sphérique.

Considérons par exemple les points de la demi-circonférence YXY′ (*fig.* 10) à 15°, 45°, 75°, 105°, 135°, 165° à partir de OY, et mesurons successivement au photomètre les inten-

sités lumineuses suivant les directions

$$0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°.$$

Fig. 10.



Multiplions ces intensités déterminées expérimentalement par 2π, puis respectivement par

$$(\cos 0° - \cos 15°), \qquad (\cos 15° - \cos 45°),$$
$$(\cos 45° - \cos 75°), \qquad (\cos 75° - \cos 105°) = 2\cos 75°,$$
$$(\cos 105° - \cos 135°) = (\cos 45° - \cos 75°),$$
$$(\cos 135° - \cos 165°) = (\cos 15° - \cos 45°),$$
$$(\cos 165° - \cos 180°) = (\cos 0° - \cos 15°).$$

Chaque produit ainsi obtenu représentera, avec une approximation suffisante si les zones sphériques sont choisies assez petites, les flux lumineux partiels. Le flux lumineux total Φ émis par la lampe sera donc égal à la somme de ces produits partiels. En appelant β_k et β_{k+1} les demi-angles au sommet des deux cônes limitant l'une quelconque des zones de la sphère et $B_{\frac{\beta_k+\beta_{k+1}}{2}}$ l'intensité lumineuse correspondante, on a

$$(5) \qquad \Phi = \sum \left[2\pi B_{\frac{\beta_k+\beta_{k+1}}{2}} (\cos\beta_k - \cos\beta_{k+1}) \right].$$

Pour trouver l'intensité lumineuse sphérique moyenne B_S il suffit de diviser ce flux lumineux par la surface de la sphère de rayon 1, c'est-à-dire par 4π, et l'on a

$$(6) \qquad B_S = \sum \left[B_{\frac{\beta_k + \beta_{k+1}}{2}} \frac{\cos\beta_k - \cos\beta_{k+1}}{2} \right].$$

M. Wild estime que, pour déterminer l'intensité lumineuse sphérique moyenne d'une lampe à incandescence, il est suffisant de mesurer l'intensité lumineuse de 30° en 30°. On multiplie alors les valeurs ainsi obtenues respectivement par les coefficients du Tableau ci-après. La première colonne indique l'angle de la direction avec l'axe suivant laquelle l'intensité lumineuse a été déterminée. Le nombre en regard dans la seconde colonne est le facteur par lequel on doit multiplier cette intensité. La somme des sept produits partiels donne la valeur de l'intensité lumineuse sphérique moyenne.

Angle de la direction avec la verticale.	Coefficient de conversion partiel.
0° (culot)	0,017
30°	0,1295
60°	0,224
90° (horizontale)	0,259
120°	0,224
150°	0,1295
180° (pointe)	0,017

Les nombres de la seconde colonne sont les valeurs successives de

$$\frac{\cos\beta_k - \cos\beta_{k+1}}{2}$$

pour $\beta_k =$	0°	15°	45°	75°	105°	135°	165°
et $\beta_{k+1} =$	15°	45°	75°	105°	135°	165°	180°

Ces coefficients représentent aussi les rapports des aires des zones sphériques à l'aire totale de la sphère.

M. W. Ambler (Mémoire lu à la *Ohio Electrical Association*, août 1905) a trouvé pour une lampe à filament de car-

bone de 110 volts, à ampoule claire, consommant 3,1 watts par candle, une intensité lumineuse horizontale moyenne de 16 candles et une intensité sphérique moyenne de 13,32 candles. Le facteur de conversion sphérique est donc pour cette lampe

$$\frac{13,32}{16} = 0,83.$$

Pour une lampe à filament de tantale Siemens et Halske, de 25 hefners à 110 volts, à ampoule claire, il a mesuré une intensité lumineuse horizontale moyenne de 22 candles et une intensité sphérique moyenne de 17,2 candles. Le facteur de conversion est dans ce cas

$$\frac{17,2}{22} = 0,782.$$

L'ampoule dépolie réduit l'intensité lumineuse horizontale de 10 à 15 pour 100, et le flux lumineux total émis par le filament dans une proportion un peu plus forte, de telle sorte que le facteur de conversion sphérique d'une lampe à ampoule dépolie est en général inférieur à celui de la même lampe avec ampoule claire. Par exemple, M. Ambler a trouvé pour une lampe à filament de tantale d'une intensité lumineuse horizontale nominale de 25 hefners, ou 22 candles, à 110 volts, à ampoule dépolie, une intensité lumineuse horizontale de 19,8 candles et une intensité lumineuse sphérique moyenne de 14,82 candles. Le facteur de conversion sphérique est donc 0,7485 au lieu de 0,782 pour la lampe à ampoule claire.

L'expérience montre que le facteur de conversion sphérique est minimum pour les lampes à un ou plusieurs filaments en fer à cheval, et qu'il croît avec le nombre de spires du filament.

Le facteur de conversion sphérique ne conserve pas nécessairement une valeur invariable pendant toute la vie de la lampe, principalement parce que le noircissement de l'ampoule peut s'effectuer irrégulièrement.

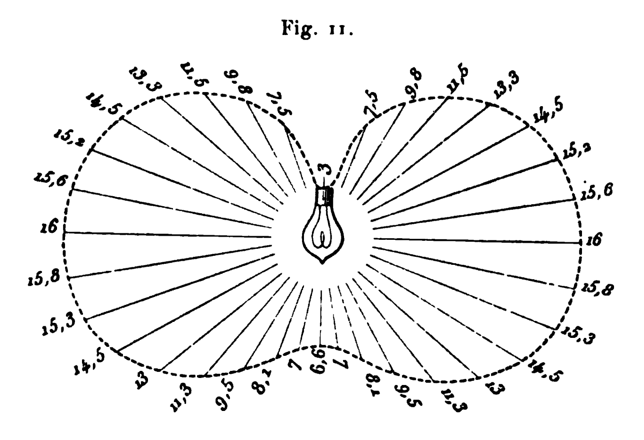
Ainsi M. Roeber a constaté la formation d'un dépôt noi-

râtre en forme d'anneau de 25^{mm} de hauteur sur l'ampoule d'une lampe à filament de tantale de 25 hefners. Ce dépôt absorbait le flux lumineux surtout dans la région horizontale, de telle sorte que, tandis que la consommation spécifique se trouvait accrue, le facteur de conversion avait pris, après un certain temps de fonctionnement, une valeur supérieure à celle qu'il avait lorsque la lampe était neuve.

IV. — Dispositifs permettant de modifier la distribution du flux lumineux émis par le filament.

MM. J.-R. Cravath et V.-R. Langsingh (*The El. World and Eng.*, 1905, nov. et déc.) ont déterminé, à l'aide d'une série de mesures photométriques effectuées dans l'*Electric Testing Laboratory* de New-York, la distribution du flux lumineux tout autour d'une lampe à incandescence de 16 candles soit nue, soit dépolie, soit enfin munie d'un abat-jour, d'un réflecteur ou d'un globe de formes diverses.

Fig. 11.



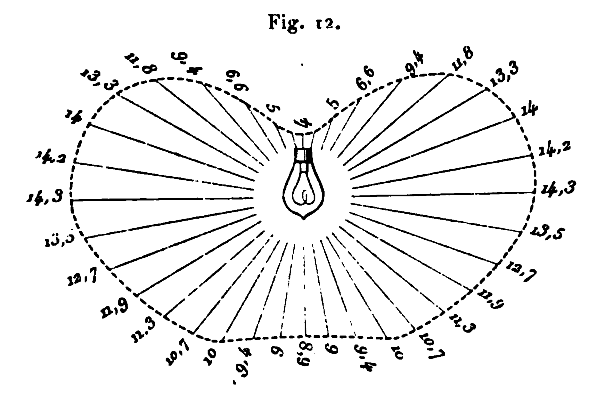
La courbe de la figure 11 représente les intensités lumineuses en candles, mesurées de 10° en 10° dans un plan méridien, pour une lampe à filament de carbone de 16 candles, à ampoule claire, nue, suspendue verticalement, la pointe dirigée vers le bas. L'intensité lumineuse est de 16 candles dans le plan horizontal et de 6,6 candles dans la direction de la pointe. L'intensité lumineuse sphérique moyenne est

de 13,24 candles. La lampe a donc, comme facteur de conversion sphérique,

$$\frac{13,24}{16}=0,827.$$

La figure 12 a trait à la même lampe que l'on a dépolie à l'acide à la suite des mesures précédentes. L'intensité lumineuse se trouve réduite à 14,3 candles dans le plan horizontal, mais elle est portée à 8,9 candles dans la direction de

Fig. 12.



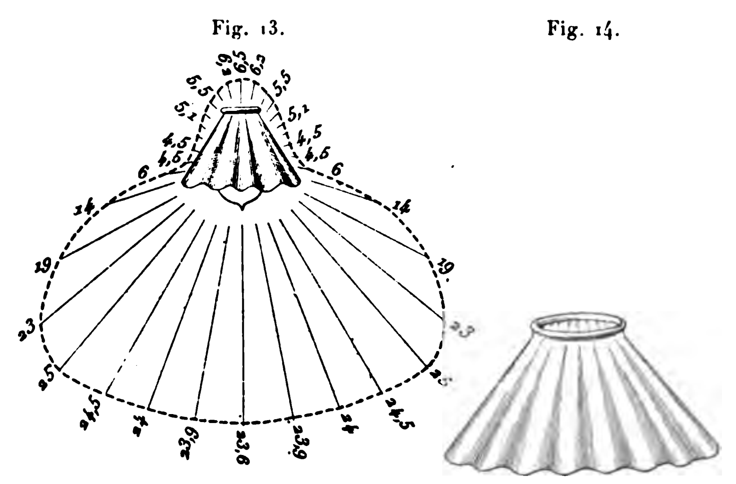
la pointe. L'intensité lumineuse sphérique moyenne n'est plus que de 11,71 candles au lieu de 13,24 pour la lampe claire. L'ampoule dépolie réduit donc le flux lumineux total de 11,5 pour 100.

Il est cependant à observer que cette perte de flux de 11,5 pour 100 se trouve compensée, et même au delà, dans un certain nombre de cas. Les sources lumineuses très brillantes, c'est-à-dire à grand éclat intrinsèque, ainsi du reste qu'un éclairage intense, déterminent la contraction de l'iris, et il résulte de la diminution du diamètre de la pupille que l'effet physiologique produit est inférieur à celui que de simples mesures photométriques feraient présumer.

Le verre dépoli diffuse la lumière de telle sorte qu'il supprime l'effet éblouissant du filament sur l'œil. Ainsi, malgré la perte de 11,5 pour 100 du flux lumineux, on peut en réalité voir mieux avec des lampes dépolies lorsque celles-ci sont placées de telle façon qu'une partie de leurs rayons tombe directement sur l'œil. Il est beaucoup plus aisé de voir au delà

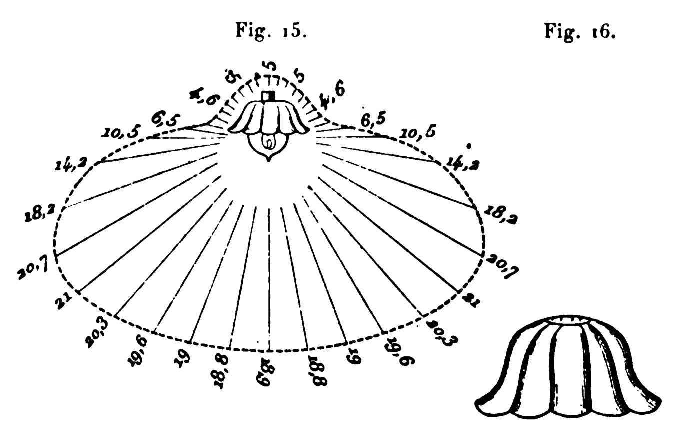
d'une lampe à ampoule dépolie qui se trouve à peu près dans la ligne de vision que si cette lampe était à ampoule claire. En outre le verre dépoli à l'acide ou au sable supprime les raies brillantes qui fatiguent la vue.

Fig. 13. Fig. 14.



Distribution de la lumière avec réflecteur opale ondulé conique.

Fig. 15. Fig. 16.



Distribution de la lumière avec réflecteur opale de 127mm.

Les lampes dépolies produisent un effet plus artistique que les lampes claires. Elles ont l'inconvénient de coûter un peu plus cher, de se salir plus facilement et de se nettoyer plus difficilement que les lampes à ampoule claire.

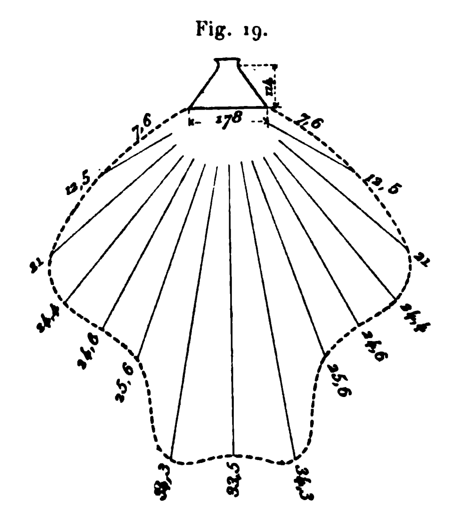
La figure 13 représente la distribution verticale du flux lumineux pour la lampe de 16 candles, à ampoule claire, munie d'un abat-jour opale, conique, ondulé (*fig.* 14), de 165mm de diamètre.

Fig. 17 et 18.

Distribution de la lumière avec réflecteur métallique de 203mm.

La figure 15 montre l'effet produit avec la même lampe

Fig. 19.

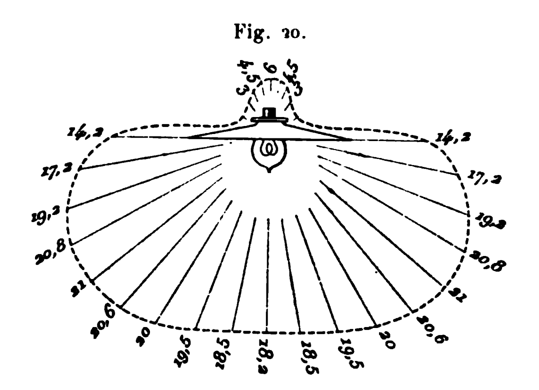


par un abat-jour opale, arrondi, de 127mm de diamètre (*fig.* 16).

Le diagramme de la figure 17 est obtenu avec la lampe de 16 candles munie d'un réflecteur conique, de métal, de 203^{mm} de diamètre, peint intérieurement en blanc.

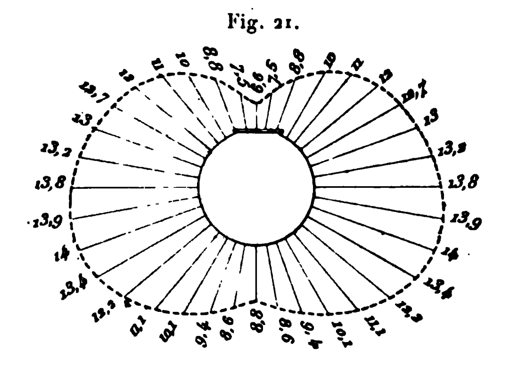
La lampe, surmontée d'un abat-jour opale de 178^{mm} de diamètre, verni extérieurement en vert et cachant complètement l'ampoule, donne la courbe de la figure 19.

Fig. 20.



Un abat-jour opale plat de 254^{mm} de diamètre (*fig.* 20) rabat bien uniformément presque tout le flux lumineux de la lampe de 16 candles vers le bas, mais il ne joue pas le rôle d'écran pour protéger les yeux.

Fig. 21.



La figure 21 représente la distribution verticale du flux lumineux pour la même lampe placée au centre d'un globe sphérique en verre dépoli au sable, de 152^{mm} de diamètre. Le globe porte une ouverture à la partie supérieure.

Si l'on désire tamiser seulement la lumière émise dans la

région inférieure, on peut employer un diffuseur hémisphérique en verre dépoli au sable (*fig.* 22). Enfin, si l'on

Fig. 22.

veut diriger toute la lumière tamisée vers le bas, on peut en outre disposer un réflecteur au-dessus de la lampe.

V. — Production de la lumière.

1° *Transformation de l'énergie électrique. Rendement lumineux.*

Lorsqu'on fait passer un courant dans un fil conducteur, de platine par exemple, l'énergie de ce courant subit une transformation. Si l'on fait croître la tension appliquée au fil, à partir d'une faible valeur, l'énergie électrique fournie se transforme tout d'abord en chaleur. Si nous appelons :

E la tension appliquée au fil, en volts ;
I le courant traversant le conducteur, en ampères ;
R la résistance du fil, en ohms,

l'énergie électrique fournie par seconde

$$EI = RI^2 \text{ joules}$$

se transforme en

$$RI^2 \frac{1}{9,81} \frac{1000}{425} \text{ calories-gramme.}$$

Une partie de cette chaleur reste associée à la matière constituant le conducteur, est emmagasinée dans le fil en vertu de la capacité calorifique de celui-ci. Elle se manifeste par une élévation de la température de la masse conductrice. La seconde partie est transmise au milieu ambiant par conduction et par rayonnement, en vertu de la différence de température produite par le premier effet. Il arrive un moment où la température du fil atteint une valeur telle que la chaleur rayonnée par seconde est égale à l'énergie électrique fournie pendant le même intervalle de temps. Si donc à cet instant la tension reste invariable, la température prend une valeur fixe, un état stationnaire est atteint.

Si nous portons la tension et, par suite, aussi le courant à une valeur suffisante pour que la température du conducteur atteigne 525°C., le fil commence à rougir, c'est-à-dire à émettre des radiations lumineuses; il devient *incandescent*. Il émet alors simultanément des radiations calorifiques et des radiations lumineuses rouges, perceptibles par l'œil. A ce moment l'énergie électrique est donc transformée partie en chaleur, partie en lumière.

Si nous continuons à augmenter la tension, le courant croît également et, si la substance est suffisamment réfractaire, comme c'est le cas pour le platine, le fil passe progressivement du rouge naissant au rouge sombre, au rouge cerise, au rouge orangé, puis au blanc, le spectre, qui comprend toujours des radiations calorifiques, s'enrichissant successivement de radiations rouges, orangées, jaunes, vertes, indigo, bleues et violettes. A 1125°C., correspondant au rouge orangé, il émet, en outre des radiations calorifiques, toutes les radiations visibles. Au-dessus de cette température il commence à fournir des radiations ultra-violettes. Au rouge blanc, c'est-à-dire vers 1300°C., il émet toutes les radiations.

Pour que la transformation de l'énergie électrique donne une proportion de lumière appréciable, c'est-à-dire pour que le rendement lumineux soit acceptable, il faut que le conducteur soit porté à une température très élevée. Il doit, par suite, être constitué par une substance très réfractaire et être placé dans des conditions telles qu'il puisse supporter cette haute température sans être détérioré, au moins pendant un temps suffisamment long.

Les substances connues capables de satisfaire à cette condition sont peu nombreuses. Les principaux corps essayés ou adoptés pour la confection des filaments de lampes à incandescence sont : en première ligne le carbone, puis un certain nombre de métaux très réfractaires, tels que le platine, l'iridium, le chrome, le titane, le molybdène, e tungstène, le ruthénium, le vanadium, le niobium, le zirconium, l'osmium, le tantale, et enfin certains oxydes éminemment réfractaires.

D'après les conceptions de la science moderne le phénomène que nous désignons sous le nom de lumière consiste en vibrations ayant pour véhicule l'*éther*, milieu dont l'existence paraît indispensable pour l'explication d'une série de phénomènes, mais qui jusqu'ici a échappé à une détermination immédiate.

Nous ne pouvons conclure à l'existence de ce milieu servant de véhicule aux vibrations que d'une façon indirecte, en admettant que l'éther a une très grande élasticité et une très faible densité. Cette hypothèse se trouve justifiée par le fait que la présence de l'éther n'a exercé jusqu'ici aucune influence sensible sur la marche des astres et que, d'autre part, la lumière traverse sans obstacle les espaces célestes dans lesquels le vide est le plus parfait.

Si une cause quelconque amène une molécule d'un corps à vibrer, ces vibrations se communiquent à la masse d'éther qui imprègne l'Univers tout entier. Si cette perturbation atteint notre œil, elle produit, dans certaines conditions, une excitation nerveuse. Si la longueur d'onde des vibrations, dont la vitesse de propagation est d'environ 3.10^{10} centimètres par seconde ou 300000 kilomètres par seconde, est comprise entre

$$0^{\mu},8 = 8.10^{-5}\text{cm.} \qquad \text{et} \qquad 0^{\mu},4 = 4.10^{-5}\text{cm.}$$

($1^{\mu} = 1$ micron $= \frac{1}{1000}$ de millimètre), nous éprouvons, par l'intermédiaire de notre œil, la sensation de l'une des couleurs de l'arc-en-ciel ou du spectre solaire, du rouge au violet. Si la longueur d'onde se trouve en dehors de ces limites, notre œil ne nous laisse percevoir aucune sensation lumineuse.

Le Tableau ci-dessous indique la longueur d'onde et le

nombre de vibrations par seconde correspondant aux diverses couleurs du spectre solaire.

COULEUR.	LONGUEUR D'ONDE λ en millièmes de millimètre.	NOMBRE DE VIBRATIONS par seconde en trillions.
Rouge très sombre.....	0,760	394
Rouge sombre.........	0,650	461
Rouge moyen.........	0,620	480
Orangé rouge.........	0,596	503
Orangé moyen........	0,583	511
Jaune orangé.........	0,571	525
Jaune moyen..........	0,551	541
Vert jaune....	0,532	563
Vert moyen...........	0,512	582
Bleu vert.......	0,492	609
Bleu moyen...........	0,475	622
Indigo bleu......... .	0,459	653
Indigo moyen	0,449	664
Violet indigo..........	0,439	683
Violet moyen.........	0,423	704
Violet extrême..	0,406	738

Les ondes lumineuses peuvent être produites par deux méthodes principales :

1° Par *luminescence,* ou transformation directe de l'énergie électrique en énergie lumineuse. C'est le principe des tubes de Geissler dans lesquels la lumière est produite par des décharges électriques à travers des gaz très raréfiés;

2° Par *incandescence,* c'est-à-dire par une température élevée. C'est la méthode utilisée dans les sources pratiques actuelles de lumière.

C'est celle que nous allons étudier.

Dans l'éclairage électrique actuel la grande majorité des radiations sont obscures, invisibles et, par conséquent, perdues pour l'éclairage.

Nous verrons plus loin que les lampes à incandescence ordinaires, à filament de carbone, ont un rendement lumineux extrêmement faible, dont la valeur varie, suivant les auteurs,

entre 2 et 6,5 pour 100, ce dernier nombre étant probablement très exagéré.

Considérons, par exemple, une lampe à filament de carbone ordinaire, consommant au début de sa vie 3,5 watts par bougie-décimale horizontale, ou, en adoptant le nombre de 0,80 pour le facteur de conversion sphérique,

$$\frac{3,5}{0,80} = 4,375 \text{ watts par bougie sphérique moyenne.}$$

Si nous admettons, suivant Angström, que l'équivalent de la radiation lumineuse d'une bougie Hefner sphérique est 0,102 watt, l'équivalent d'une bougie-décimale est

$$0,102 \times 1,123 = 0,1146 \text{ watt,}$$

et le rendement lumineux de la lampe considérée, au début de sa vie,

$$\frac{0,1146}{4,375} = 2,6.10^{-2}.$$

Cette valeur est supérieure au rendement moyen de la lampe pendant sa vie. Mendenhall a trouvé pour le rendement lumineux du filament d'une lampe à incandescence ordinaire, à l'éclat normal, environ 2,6 pour 100.

Si l'on possédait des lampes ayant un rendement égal à l'unité, 1 cheval électrique produirait donc

$$\frac{736}{0,102} = 7215,7 \text{ hefners sphériques}$$

ou

$$\frac{736}{0,1146} = 6422 \text{ bougies-décimales sphériques,}$$

soit 494 lampes de 13 bougies-décimales sphériques moyennes ou d'environ 16 bougies horizontales.

Si l'on pouvait augmenter suffisamment le rendement actuel de la transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse, le porter par exemple à 40 ou 50 pour 100, l'éclairage électrique se substituerait, par raison d'économie, à tous les autres systèmes d'éclairage aujourd'hui en usage.

Pour accroître le rendement lumineux par l'augmentation de la température du filament, on a été amené à rechercher les matières les plus réfractaires et capables de supporter cette haute température pendant un temps suffisamment long pour que le coût du remplacement de la lampe ne soit pas exagéré et ne compense pas l'économie réalisée sur l'énergie consommée.

Quelques-unes de ces tentatives ont été couronnées de succès sans parvenir toutefois à faire dépasser au rendement lumineux une très petite valeur. La cause du faible rendement de la méthode actuelle d'éclairage électrique réside dans l'emploi de la chaleur comme forme intermédiaire d'énergie, laquelle entraîne toujours un rendement excessivement bas.

On considère, dans la théorie du rayonnement, les *corps noirs*. D'après la définition de Kirchhoff, la matière parfaitement *noire* serait celle qui absorberait toutes les radiations tombant sur elle et n'en réfléchirait aucune.

Il n'existe pas de substance parfaitement noire; le charbon est l'une des plus noires que nous connaissions. Mais pour qu'un corps absorbe ainsi les radiations, il faut qu'il ait une surface mate, car un corps dense et poli, comme le jais, peut devenir un bon miroir tout en conservant sa couleur noire. Dans le sens de la théorie du rayonnement un corps à surface grossière se rapproche plus de la matière noire qu'un corps à surface lisse.

Les corps blancs ou parfaitement polis possèdent la propriété de réfléchir tous les rayons du spectre. Un corps qui est blanc sous les rayons du soleil paraît rouge quand on n'envoie à sa surface que des rayons rouges, et de même pour les autres couleurs.

Les corps noirs sont caractérisés par la particularité que, pour une température donnée, le rapport des radiations à ondes longues aux radiations à ondes courtes qu'ils émettent est maximum.

Les corps qui diffèrent de la matière noire émettent, pour une même température, une puissance totale moindre que les corps noirs. En outre, ils ont la propriété de fournir une grande proportion de radiations visibles à une température

relativement modérée. On dit qu'ils ont un rayonnement sélectif, ou que leur émission est sélective, ou encore qu'ils sont doués de pouvoir sélectif de longueurs d'onde.

On a trouvé que parmi les substances expérimentées c'est le platine qui, au point de vue du rayonnement, diffère le plus de la matière noire, c'est-à-dire qui a les propriétés sélectives les plus marquées.

Considérons un filament conducteur formé de matière noire et, par conséquent, dépourvu de propriétés sélectives à toutes températures, placé dans le vide absolu. Chauffons ce filament, par exemple, en le faisant traverser par un courant électrique.

Stefan a démontré que la puissance totale rayonnée par un tel filament est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue. C'est la loi de Stefan.

D'autre part, les corps environnants rayonnent à leur tour sur le filament une certaine puissance proportionnelle elle aussi à la quatrième puissance des températures absolues de ces corps. La puissance résultante rayonnée par le filament est la différence entre les radiations fournies et celles reçues.

Pour que le filament émette des radiations lumineuses, sa température doit être portée au-dessus de celle du rouge sombre, c'est-à-dire au-dessus de 525°C. Le rendement lumineux est alors égal au rapport de la puissance rayonnée sous forme de radiations visibles à la puissance totale reçue.

Appelons :

E la tension aux bornes, en volts;
r le rayon du filament, en centimètres;
l sa longueur, en centimètres;
R sa résistance, en ohms;
Θ sa température absolue;
Θ_0 la température ambiante absolue;
K une constante de rayonnement.

La puissance fournie au filament est

$$P = \frac{E^2}{R} \text{ watts} \tag{1}$$

et la surface du filament

(2) $$S = 2\pi r l \text{ cm}^2.$$

On a donc, d'après ce qui précède,

(3) $$\frac{E^2}{R} = K(\Theta^4 - \Theta_0^4)\, 2\pi r l.$$

La quantité $K(\Theta^4 - \Theta_0^4)$ est la puissance rayonnée par 1^{cm^2} de surface du filament.

Soient ρ la résistivité et γ la conductibilité de la matière constituant le filament, à la température absolue Θ, On a

(4) $$R = \frac{\rho l}{\pi r^2}$$

et

(5) $$\frac{1}{R} = \frac{\gamma \pi r^2}{l}.$$

En portant cette valeur de $\frac{1}{R}$ dans la relation (3), celle-ci prend la forme

$$\frac{E^2 \gamma \pi r^2}{l} = K(\Theta^4 - \Theta_0^4)\, 2\pi r l$$

ou

(6) $$\frac{E^2 \gamma}{2} \frac{r}{l^2} = K(\Theta^4 - \Theta_0^4).$$

C'est la relation établie par Stefan et Boltzmann. Elle permet de calculer la température absolue Θ du filament si l'on connaît la tension E sous laquelle fonctionne la lampe, la conductibilité γ et la température ambiante absolue Θ_0. Il est cependant à observer que γ n'est pas constant, mais qu'il dépend de la température Θ. On peut du reste déterminer γ en mesurant la puissance fournie au filament.

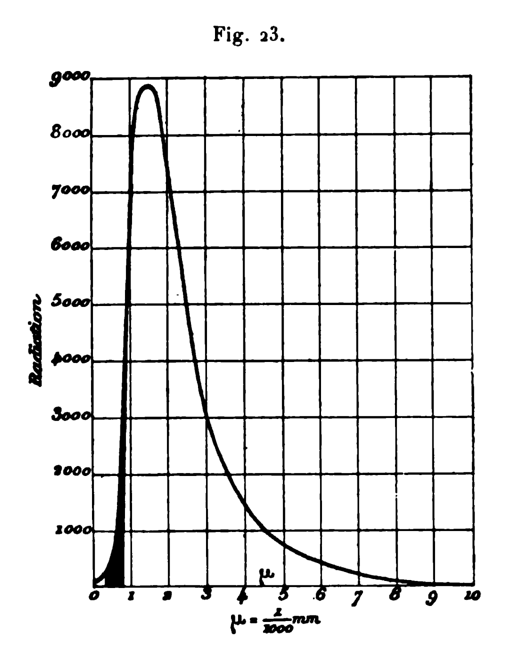
La radiation totale se compose d'ondes de longueurs différentes, mais l'effet physiologique lumineux est produit sur l'œil normal seulement par les ondes dont la longueur est comprise entre $0^{\mu},8$ ou 8.10^{-5}cm. et $0^{\mu},4$ ou 4.10^{-5}cm., c'est-à-dire dont la fréquence se trouve entre 39.10^{13} et 76.10^{13} périodes par seconde.

D'autre part, les radiations dont la longueur d'onde est inférieure à $0^{\mu},5$ ou supérieure à $0^{\mu},6$ ont une importance secondaire au point de vue de l'effet physiologique qu'elles produisent.

Décomposons, à l'aide d'un prisme, la radiation émise par le filament en ses différentes longueurs d'onde. Nous pourrons déterminer pour chacune des longueurs d'onde la puissance rayonnée.

La courbe de la figure 23 a été déterminée par le professeur

Fig. 23.



Lummer pour une lampe à filament de carbone. Les longueurs d'onde sont portées en abscisses et les puissances rayonnées correspondantes, en ordonnées. Dans le cas particulier de cette expérience le maximum de puissance correspond à la longueur d'onde $\lambda = 1^{\mu},5$ ou 15.10^{-5} cm. Puisque la visibilité pour l'œil humain commence à $0^{\mu},8$ et s'étend jusqu'à $0^{\mu},4$, le maximum de la puissance rayonnée ne peut pas, dans ce cas, être utilisé pour la production de la lumière et se trouve

perdu pour cette application. La partie hachurée du diagramme est seule visible, utilisable comme lumière.

L'idéal que l'on cherche à réaliser pour une lampe, au point de vue de l'utilisation de l'énergie qu'on lui fournit, c'est que le filament incandescent donne un spectre de rayonnement tel que la plus grande partie de son aire tombe dans la région des longueurs d'onde visibles.

La position de l'onde de puissance maximum dans le spectre est donnée par la *loi de déplacement de Wien,* laquelle s'énonce ainsi :

Le produit de la longueur d'onde λ_m de puissance maximum par la température absolue Θ de la source est constant :

$$\lambda_m \Theta = \text{const.} \tag{7}$$

Cette équation représente une hyperbole équilatère. Si la longueur λ_m est exprimée en centimètres, la constante, pour un corps noir, est égale à 0,2940.

Cette loi montre que, si la température du filament incandescent augmente, la puissance maximum se déplace vers les ondes plus courtes.

Si l'on voulait que la puissance maximum se trouvât à l'intérieur du spectre visible, par exemple à la longueur d'onde $0^\mu,6$ ou 6.10^{-5}cm., non loin de la ligne D du sodium, la température absolue du filament en matière noire devrait être de 4900°, correspondant à plus de 4600°C., température bien supérieure à celles que nous pouvons espérer atteindre dans les lampes à incandescence.

La puissance rayonnée totale augmente très rapidement avec la température. Mais, comme le maximum se déplace vers les ondes courtes au fur et à mesure que la température croît, les radiations dans la partie la plus réfrangible du spectre sont d'autant plus avantagées que la température est plus haute. Pour le filament en matière noire la lumière blanchit donc en même temps que la température s'élève. En outre, la puissance lumineuse augmente plus rapidement que la puissance rayonnée totale.

La distribution spectrale de la puissance dans le rayonnement d'un corps noir est déterminée par une seconde loi de Wien modifiée par Plank.

Si l'on appelle :

P_λ la puissance correspondant à la longueur d'onde λ dans le spectre;
Θ la température absolue du corps noir incandescent;
C_1 et C_2 des constantes;
e la base des logarithmes naturels;
cette loi est exprimée par la relation

$$(8) \qquad P_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda\Theta}} - 1}.$$

On a vérifié expérimentalement que cette relation représente très exactement les faits, au moins dans toute l'étendue des expériences effectuées.

Les formules précédentes représentent les lois fondamentales du rayonnement d'un corps noir. La relation (8) permettrait de calculer la distribution exacte de la puissance dans le spectre d'un filament noir à une température donnée quelconque, ou bien encore de déterminer la température pour laquelle la puissance dans le spectre visible devient maximum. On trouverait ainsi la température pour laquelle on obtiendrait le rendement lumineux d'une lampe à filament de matière noire le plus élevé possible.

Mais ces calculs n'offriraient pas un grand intérêt pratique, tout d'abord parce que la loi de déplacement de Wien montre que la température cherchée se trouve bien au-dessus de celles que nous pouvons atteindre dans la pratique, et en second lieu parce qu'un filament de matière noire n'est pas l'idéal désiré. Au contraire, ce que nous devons chercher pour le filament, c'est une substance qui, tout en étant éminemment réfractaire, possède un pouvoir sélectif élevé.

A une température donnée la radiation totale d'un corps différent de la matière noire étant moindre que celle d'un corps noir, si nous substituons au filament noir un filament en matière non noire, toutes choses égales d'ailleurs, l'équation fondamentale (6), page 38, n'est plus applicable. La condition stationnaire, représentée par l'égalité de la même puissance électrique fournie et de la puissance rayonnée totale, exigerait maintenant une température plus élevée

qu'avec un filament de matière noire. Mais ce qui est plus important que la radiation totale, c'est la distribution de la puissance rayonnée sur tout le spectre.

Nous avons dit que le platine poli est, de toutes les substances expérimentées, celle qui diffère le plus d'un corps noir. Dans la loi de déplacement de Wien,

$$\lambda_m \Theta = \text{const.},$$

la constante est égale à 0,2940 pour la matière noire et à 0,2626 pour le platine poli (Lummer et Pringsheim), la longueur d'onde λ_m étant exprimée en centimètres. La température absolue Θ, pour laquelle le maximum de puissance est à une certaine longueur d'onde, est donc inférieure d'environ 10 pour 100 avec le platine poli à celle qui serait nécessaire avec un corps noir. Il en résulte qu'un filament de platine chauffé à la même température aura un spectre présentant son maximum de puissance plus près de la région visible qu'un filament de matière noire. Son pouvoir sélectif étant en moyenne de 60 pour 100 dans la partie visible du spectre, le filament de platine émet, pour une quantité donnée de radiations lumineuses, beaucoup moins de radiations invisibles, c'est-à-dire perdues pour l'éclairage, qu'un filament noir. En outre, comme le pouvoir sélectif, qui est en moyenne de 60 pour 100 dans le spectre visible, va en augmentant du rouge au violet, les radiations d'onde courte se trouvent avantagées, de telle sorte qu'à température égale le platine poli incandescent donne une lumière notablement plus blanche que le corps noir, dont le filament de carbone ne diffère pas beaucoup. Néanmoins, le platine poli, sans parler de sa trop grande fusibilité, est encore très éloigné de la matière idéale au point de vue du rayonnement.

La différence que présente un corps avec la matière noire idéale, au point de vue du rayonnement, ne dépend pas seulement de sa substance, mais aussi, jusqu'à un certain degré, de la nature et de la configuration de sa surface. Plus celle-ci est poreuse, plus il se comportera comme un corps noir. Le filament doit donc avoir une surface sans pores, polie.

M. Fritz Blau a signalé l'importance de cette condition pour la lampe à filament d'osmium. L'accroissement initial

de l'intensité lumineuse de cette lampe après la fermeture du circuit, phénomène que l'on observe à peu près avec toutes les sortes de filaments, se continue pendant une période de longueur exceptionnelle, atteignant parfois 200 heures. Cette croissance de l'intensité lumineuse est due à la continuation de la formation du filament dont les particules se soudent plus intimement les unes aux autres et dont la surface devient plus polie.

Les fabricants de lampes à incandescence ont depuis longtemps découvert soit par expérience, soit par intuition, cette supériorité de la surface polie, car ils ont abandonné le filament mat qui, pour une surface et une température données, émet le maximum de radiation, pour adopter le filament poli qui fournit la lumière avec un meilleur rendement parce qu'il possède en partie l'éclat métallique.

Les lampes à filament de métal mettent à profit autant que possible cette propriété sélective de longueur d'onde de la surface polie si en même temps le métal est suffisamment réfractaire pour qu'il puisse être porté à une température égale ou supérieure à celle que supporte le filament de carbone.

Il est de toute possibilité que le nouveau filament de carbone graphité de la *General Electric C°* présente quelque chose d'analogue, puisque le traitement auquel il est soumis, tout en modifiant la matière noire du filament, intéresse surtout sa surface.

On a observé que la diminution de l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de carbone, à partir d'une certaine époque de sa vie, est due en partie à une réduction du pouvoir sélectif produite par une projection de particules de carbone du filament. La diminution du pouvoir émissif de radiations lumineuses est peut-être due à la formation de pores, ou petits trous, à la surface du filament par cette projection de particules de carbone. Ces pores augmentent la surface rayonnante totale. Comme la puissance électrique fournie n'est pas augmentée, le filament est moins chaud, se refroidit plus que si sa surface était unie. Il émet donc un flux lumineux moindre, sa teinte est moins blanche et son rendement lumineux est inférieur.

Les particules de carbone projetées se déposent sur l'ampoule et déterminent, comme effet secondaire, le noircissement de celle-ci.

Remarquons que, si l'on employait des lampes à incandescence comme rhéostat ou comme appareil de chauffage, il y aurait au contraire intérêt à ce que le filament fût mat, car alors pour une même température il rayonnerait une puissance supérieure et l'appareil serait, par suite, plus puissant que si le filament était poli.

Les nouvelles lampes à filament d'osmium, de tantale et de carbone graphité fonctionnent à des températures plus élevées que les lampes à filament de carbone ordinaires, mais il est probable que l'augmentation de rendement réalisée par ces lampes est due non seulement à une plus haute température, mais encore aux propriétés sélectives de longueurs d'onde de ces nouveaux filaments.

La blancheur de la lumière émise par les lampes à filament d'osmium ou de tantale donne à penser que ces métaux se comportent à peu près comme le platine. Cette couleur de la lumière est due probablement à la fois à la température très élevée et à la surface gris clair, polie, de leurs filaments. Suivant M. Siedeck, le filament de tantale d'une lampe de 25 hefners horizontaux à 110 volts possède à 85 volts la même teinte que le filament de carbone d'une lampe à incandescence ordinaire à la tension normale.

La teinte de la lumière émise par le filament d'une lampe à incandescence permet de juger approximativement de sa consommation spécifique, puisque, comme nous l'avons vu, la teinte et le rendement sont tous deux fonction de la température.

M. L. Bell donne le Tableau suivant, indiquant la relation entre la teinte de la lumière et la consommation spécifique des lampes à incandescence ordinaires à filament de carbone en watts par candle horizontale.

Nous avons complété le Tableau par l'indication de la consommation spécifique en watts par bougie décimale.

CONSOMMATION SPÉCIFIQUE en watts par candle.	CONSOMMATION SPÉCIFIQUE en watts par bougie décimale.	TEINTE de la lumière.
1,5	1,48	Blanc clair.
2,0 à 2,5	1,98 à 2,47	Blanc légèrement teinté de jaune.
3,0	2,97	Blanc jaune.
3,5	3,46	Jaune.
4,0	3,96	Jaune légèrement teinté d'orangé.
4,5	4,45	Jaune orangé.
5,0	4,95	Rouge orangé caractérisé.

Les conclusions que l'on peut tirer de l'usage de ce Tableau ne sont naturellement qu'approximatives, car elles reposent sur le jugement de chaque observateur.

Température du filament. — D'après les expériences de Mendenhall, le rendement lumineux du filament de carbone d'une lampe à incandescence ordinaire, à l'éclat normal, est d'environ 2,6 pour 100. Si la matière du filament était parfaitement noire, sa température absolue serait alors d'environ 2150°, correspondant à 2150° — 273° = 1877° C. Mais, en vertu de l'émission sélective, la température réelle est moins élevée, et l'on peut admettre que dans les lampes modernes elle est voisine de 1800° C.

M. Ingersoll a trouvé pour le bâtonnet de la lampe Nernst, après 40 heures de fonctionnement, un rendement, défini comme rapport de la puissance visible à la puissance totale, de 4,17 pour 100, correspondant à une température de 2360° C. MM. Lummer et Pringsheim ont indiqué 2200° C. et 2450° C.

2° *Mesure du rendement lumineux.*

D'après ce qui précède, le rendement lumineux d'une lampe peut être défini comme étant le rapport de la puissance des radiations comprises dans le spectre visible à la puissance totale fournie à la lampe, cette dernière quantité étant, dans l'état de régime, égale à la puissance rayonnée totale.

Pour déterminer le rendement lumineux d'une source de lumière, on a donc à mesurer, d'une part, la puissance des radiations lumineuses et, d'autre part, la puissance fournie à la lampe ou la puissance rayonnée totale.

L'une des premières méthodes employées pour cette détermination est basée sur la propriété que possède l'eau d'absorber les radiations calorifiques. On fait passer la totalité des radiations d'un faisceau lumineux à travers une couche d'eau qui absorbe les radiations obscures, tandis qu'elle se laisse traverser par les radiations lumineuses. L'eau produit, pour ainsi dire, un tamisage des radiations.

Suivant M. Roeber, les premières recherches expérimentales sur la détermination du rendement lumineux ont été faites par M. Julius Thomsen et par M. O. Tumlirz.

M. Tumlirz a trouvé pour la puissance lumineuse d'une bougie Hefner sphérique 0,188 watt. En d'autres termes, l'équivalent mécanique d'une bougie Hefner sphérique serait, d'après M. Tumlirz, égal à 0,188 watt. Mais la méthode d'absorption par l'eau, employée dans cette détermination, est sujette à objections. En effet, l'absorption des ondes obscures par l'eau n'est totale qu'à partir d'une certaine distance du spectre visible, de telle sorte que, malgré le tamisage à travers la couche d'eau, une partie de l'énergie obscure accompagne l'énergie lumineuse. L'équivalent mécanique de la lumière obtenu de cette manière a donc une valeur trop élevée.

M. Angström a déterminé l'équivalent mécanique de la lumière par la méthode suivante :

Pour séparer les radiations visibles des radiations obscures, il décompose le faisceau lumineux au moyen d'un prisme et arrête, à l'aide d'un diaphragme, les radiations autres que les rayons lumineux, visibles. Puis, au moyen d'une lentille cylindrique, il recompose les radiations non arrêtées en lumière blanche qu'il équilibre photométriquement par la radiation totale d'une source de lumière tout à fait identique. Il remplace alors le photomètre par une pile thermo-électrique. Le résultat qu'il a obtenu par cette méthode semble être le meilleur de ceux dont on dispose actuellement.

M. Angström a trouvé que l'équivalent de la radiation lumineuse d'une bougie Hefner, par centimètre carré à une dis-

tance de 1^m (1 hefner-mètre), est 8,1 ergs par seconde. La puissance lumineuse totale de 1 hefner est donc

$$4\pi . 100^2 . 8,1 \text{ ergs par seconde} = 102 . 100^2 . 10^{-7} \text{ watts.}$$

L'équivalent mécanique de 1 hefner sphérique est donc 0,102 watt. C'est presque seulement la moitié de l'équivalent de Tumlirz.

L'équivalent d'une bougie décimale sphérique est donc

$$0,102 \times 1,123 = 0,1146 \text{ watt}$$

et celui d'une candle sphérique

$$0,102 \times 1,136 = 0,1159 \text{ watt.}$$

1 watt dans une lampe qui aurait un rendement égal à l'unité produirait donc

9,80 hefners sphériques,

ou

8,72 bougies décimales sphériques,

ou encore

8,62 candles sphériques.

M. Roeber indique que, d'après des essais de laboratoire effectués récemment en Amérique, l'un des types nouveaux de lampes à incandescence dont le rendement est l'un des plus élevés obtenus jusqu'à ce jour, la lampe Siemens et Halske à filament de tantale de 25 hefners horizontaux à 110 volts, consomme au début de sa vie 1,75 watt par hefner horizontal, et 2,24 watts par hefner sphérique moyen, les moyennes pendant la vie utile de la lampe étant respectivement 1,937 et 2,376 watts. Le rendement moyen de cette lampe est donc, d'après l'équivalent d'Angström,

$$\frac{0.102}{2,376} = 4,29 . 10^{-2}.$$

Considérons encore une lampe à incandescence ordinaire, à filament de carbone, consommant au début de sa vie 3,5 watts par bougie décimale horizontale et 4,4 watts par bougie décimale sphérique, et en moyenne pendant sa vie utile 4,7 watts par bougie décimale sphérique. Le rendement

moyen de la lampe est

$$\frac{0,1146}{4,7} = 2,44 \cdot 10^{-2}.$$

On a aussi tenté de déterminer l'équivalent mécanique de la lumière au moyen d'un arc jaillissant entre deux électrodes de composition analogue à celle des manchons Auer v. Welsbach, ou encore en faisant brûler instantanément une lampe à incandescence à l'aide d'une tension élevée. On mesure dans chaque cas la puissance électrique absorbée et l'intensité lumineuse.

Quoique le rendement lumineux dans ces dernières expériences soit considérablement supérieur à celui que l'on obtient dans les conditions normales, il y a une puissance très importante en dehors du spectre visible, et une puissance encore plus grande en dehors du spectre utile, de telle sorte que le rendement lumineux est très notablement inférieur à l'unité.

En pratique nous comparons les sources de lumière, dont la composition spectrale peut être différente, par leur intensité lumineuse. Comme l'effet physiologique des rayons lumineux sur l'œil normal est fonction de la longueur d'onde, la relation entre l'unité d'intensité lumineuse et les autres unités de puissance doit être elle-même fonction de la longueur d'onde. Dans les mesures photométriques industrielles, nous comparons des sources lumineuses dont la composition spectrale n'est pas identique; nous faisons alors la moyenne des effets physiologiques des diverses radiations de longueurs d'onde différentes.

Les résultats obtenus par détermination expérimentale de l'équivalent mécanique de la lumière doivent donc, s'ils ne sont pas limités à une seule longueur d'onde, être considérés comme n'ayant pas une valeur absolue, quoiqu'ils offrent un grand intérêt, comme donnant une première approximation de la réalité.

Pour tenir compte des conditions physiologiques, on doit prendre en considération la couleur de la lumière. Ces conditions ne comportent pas une lumière monochromatique, mais les trois lumières primaires.

VI. — Variation de l'intensité lumineuse d'une lampe a incandescence avec la tension aux bornes et la puissance électrique absorbée.

Une lampe à filament de carbone ordinaire commence à devenir lumineuse à une tension d'environ 20 pour 100 de la tension normale de fonctionnement. Pour une lampe à filament de tantale de 25 hefners 110 volts, cette limite est, d'après les expériences de MM. A.-E. Kennelly et S.-E. Whiting, de 9,5 volts, soit environ 9 pour 100 de la tension normale. Cette différence entre les tensions produisant un commencement d'incandescence dans les deux types de lampes est due à ce que la résistance du filament de carbone possède sa valeur la plus élevée à froid, tandis que la résistance du filament de tantale est minimum dans ces conditions.

L'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence à filament croît plus rapidement que la puissance qui lui est fournie.

On a proposé plusieurs formules empiriques pour représenter la variation de l'intensité lumineuse B d'une lampe à incandescence soit avec la puissance absorbée P, soit avec le courant I ou la tension E aux bornes.

L'une des formules les plus simples s'appliquant aux lampes à filament de carbone est

$$B = AP^3, \tag{1}$$

dans laquelle A est un coefficient constant. Mais elle ne convient que pour des valeurs de la puissance P comprises entre des limites très rapprochées.

La formule

$$B = aP + bP^2, \tag{2}$$

dans laquelle a et b sont des coefficients déterminés expérimentalement, donne des résultats suffisamment exacts entre des limites beaucoup plus éloignées que celles que comporte la relation précédente.

On a indiqué, pour représenter l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de carbone en fonction du courant, la for-

mule

(3) $$B = kI^6.$$

La formule simple que nous avons trouvée applicable aux lampes à filament de carbone entre les limites les plus éloignées est

(4) $$B = KE^6,$$

dans laquelle K est un coefficient déterminé par l'expérience. D'après cette relation, l'intensité lumineuse d'une lampe à *filament de carbone* est proportionnelle à la sixième puissance de la tension à ses bornes. Cette formule a, en particulier, sur les précédentes, l'avantage d'exprimer l'intensité lumineuse d'une lampe directement en fonction de la tension à ses bornes.

Le Tableau I donne les valeurs de l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de carbone de 8 candles à 50 volts, indiquées par M. Stine pour les tensions de 50, 55 et 56 volts. La dernière colonne renferme les valeurs que nous avons calculées à l'aide de la formule

$$B = 5,1 . 10^{-10} E^6.$$

I. — *Lampe à filament de carbone de* 8 *candles,* 50 *volts.*

TENSION aux bornes, en volts.	PUISSANCE absorbée, en watts.	INTENSITÉ LUMINEUSE HORIZONTALE en candles, mesurée.	calculée.
50	28	8	7,97
55	34	13	14,1
56	36	15,5	15,72

Nous empruntons les nombres inscrits dans les colonnes 1, 2, 3, 4 et 6 du Tableau II, au Mémoire de M. Bainville, intitulé : *Sur les lampes à incandescence* (*Société internationale des Électriciens,* 3 mai 1905). Nous avons calculé les nombres de la cinquième colonne au moyen de la formule

$$B = 8,55 . 10^{-12} E^6.$$

II. — *Lampe à filament de carbone de* 16 *bougies,* 110 *volts.*

TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ LUMINEUSE horizontale en bougies décimales		CONSOMMATION spécifique en watts par bougie.
			mesurée.	calculée.	
66	0,287	19	0,5	0,7	38
79	0,352	27,8	1,7	2,07	16,3
91,6	0,415	38	4,8	5,0	7,9
98	0,447	43,8	7,4	7,57	5,92
104,2	0,479	50	11,1	10,95	4,5
107,5	0,495	53,2	13,2	13,2	4,03
113,7	0,527	60	18,7	18,5	3,2
120	0,561	67,5	25,5	25,53	2,65
132,7	0,630	83,5	45	46,70	1,85
144,7	0,702	101,5	72	78,5	1,41

Les formules (3) et (4) ne concordent que pour des valeurs de la tension et du courant comprises entre des limites suffisamment rapprochées pour que la résistance de la lampe puisse être considérée comme constante entre ces limites. Dans ces conditions, les relations (1), (3) et (4) sont évidemment équivalentes.

Pour une lampe à filament de carbone normale, on peut donner, à titre d'indication approximative, le Tableau suivant :

III. — *Lampe à filament de carbone.*

TENSION AUX BORNES en pour 100 de la tension normale.	RAPPORT DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE obtenue à l'intensité lumineuse normale.
90	0,5
95	0,73
99	0,94
100	1
101	1,06
105	1,33
112,5	2
150	10

Pour les lampes à filament d'osmium et celles à filament de tantale, nous avons trouvé que la formule

$$(5) \qquad B = KE^4$$

est applicable entre des limites assez éloignées.

Les Tableaux IV et V, que nous empruntons au Mémoire précité de M. Bainville, concernent deux lampes à filament d'osmium. Nous avons calculé les nombres de la cinquième colonne du Tableau IV à l'aide de la formule

$$B = 4,4.10^{-5}E^4,$$

et ceux de la cinquième colonne du Tableau V par la formule

$$B = 1,065.10^{-5}E^4.$$

IV. — *Lampe à filament d'osmium de 25 hefners, 28 volts.*

TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ LUMINEUSE horizontale en bougies décimales — mesurée.	INTENSITÉ LUMINEUSE horizontale en bougies décimales — calculée.	CONSOMMATION spécifique en watts par bougie.
28	1,44	40	27,5	27,04	1,46
30	1,51	45	35,5	35,6	1,28
33	1,60	52,9	51,5	52,7	1,02
35	1,67	58,5	65,5	66,0	0,89

V. — *Lampe à filament d'osmium de 25 hefners, 40 volts.*

TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ LUMINEUSE horizontale en bougies décimales — mesurée.	INTENSITÉ LUMINEUSE horizontale en bougies décimales — calculée.	CONSOMMATION spécifique en watts par bougie.
32	1,06	34	11,2	11,16	3,05
35	1,13	39,5	16,5	16,0	2,4
40	1,23	49,2	27,2	27,26	1,81
43	1,29	55,5	36,5	36,4	1,52

Nous reproduisons partiellement ci-dessous un Tableau de M. Lombardi (*L'Ind. électr.*, 1904, févr. 25), auquel nous ajoutons les nombres de la colonne 6, que nous avons calculés à l'aide de la formule

$$B = 2,4262.10^{-5}E^4.$$

VI. — *Lampe à filament d'osmium de 25 hefners, 40 volts.*

TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	RÉSISTANCE du filament en ohms.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ lumineuse en hefners		CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.
				mesurée.	calculée.	
15,9	0,502	31,6	7,97	0,39	0,7	20,5
20,0	0,581	34,4	11,62	1,32	1,75	8,8
24,1	0,656	36,8	15,82	3,17	3,68	5,0
28,0	0,722	38,8	20,22	6,29	6,71	3,22
31,6	0,782	40,5	24,74	10,64	9,97	2,32
35,2	0,840	42,0	29,60	17,06	16,78	1,74
39,5	0,903	43,7	35,66	26,6	26,6	1,34
43,5	0,962	45,2	41,83	39,3	39,12	1,06
47,4	1,021	46,4	48,36	54,2	55,16	0,89
51,2	1,080	47,4	55,80	75,1	75,09	0,74

Nous extrayons encore le Tableau VII du Mémoire de M. Bainville, en lui adjoignant la colonne 6, dont nous avons obtenu les nombres à l'aide de la formule

$$B = 1,414.10^{-7}E^4.$$

VII. — *Lampe à filament de tantale de 25 hefners, 110 volts.*

TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	RÉSISTANCE du filament en ohms.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ lumineuse horizontale en bougies décimales		CONSOMMATION spécifique en watts par bougie.
				mesurée.	calculée.	
105	0,375	280	39	17,4	17,19	2,37
110	0,385	285	42,5	20,7	20,7	2,05
115	0,400	287,5	46	24,9	24,73	1,85
120	0,420	287	49	28,5	29,3	1,72

Enfin le Tableau VIII renferme les résultats des mesures effectuées par MM. A.-E. Kennelly et S.-E. Whiting sur une lampe à filament de tantale à ampoule dépolie. Nous avons inscrit, dans la troisième colonne, les intensités lumineuses, que nous avons calculées par la formule

$$B = 1,23.10^{-7}E^4.$$

VIII. — *Lampe à filament de tantale de* 25 *hefners,* 110 *volts, à ampoule dépolie.*

TENSION aux bornes en volts.	INTENSITÉ LUMINEUSE HORIZONTALE en candles		CANDLES par watt.
	mesurée.	calculée.	
90	7	8,06	0,26
96	10	10,44	0,35
100	12,5	12,30	0,44
104	15	14,38	0,50
110	18	18	0,55
120	27	25,5	0,60
130	37	35,1	0,68

Les formules et les Tableaux qui précèdent montrent que l'intensité lumineuse varie beaucoup moins rapidement avec la tension pour les lampes à filament d'osmium ou de tantale que pour les lampes ordinaires à filament de carbone. Cette différence entre les deux groupes de lampes est due, au moins en majeure partie, à ce que la résistance des filaments d'osmium ou de tantale croît avec la puissance qui leur est fournie, tandis que la résistance du filament de carbone décroît dans ces conditions, au moins entre des limites éloignées.

Il en résulte que, pour un même écart au-dessus ou au-dessous de la tension normale, la variation de la puissance absorbée par le filament d'osmium ou de tantale est moins grande que pour le filament de carbone.

Les lampes à filament d'osmium et celles à filament de tantale sont donc moins sensibles que les lampes ordinaires à

filament de carbone, *au point de vue de l'intensité lumineuse*. La résistance des filaments métalliques joue un rôle régulateur.

VII. — Vie des lampes a incandescence.

Il résulte de l'étude précédente, et en particulier des Tableaux qu'elle renferme, que, si l'on accroît la tension aux bornes d'une lampe à incandescence, non seulement on augmente son intensité lumineuse, mais encore que celle-ci croît dans un rapport plus élevé que la puissance absorbée. Autrement dit, la lampe produit une intensité lumineuse par watt d'autant plus grande que la tension est plus haute, ou encore le rendement de la lampe croît avec la tension.

Il semblerait donc, à première vue, que l'on aurait intérêt à faire fonctionner les lampes à incandescence à une forte tension. Mais l'expérience montre, d'autre part, que la durée des lampes diminue rapidement lorsque la tension de fonctionnement croît.

Si l'on soumet un lot de lampes identiques à autant de tensions formant échelle croissante, on constate qu'elles brûlent après un temps de fonctionnement d'autant plus court que la tension est plus élevée. La vie totale ou *vie absolue* d'une lampe à incandescence est donc d'autant moins longue que la tension de fonctionnement est plus haute. Pour une certaine valeur de celle-ci, ainsi que pour les valeurs supérieures, le filament brûle instantanément. On appelle cette valeur limite *tension de rupture*.

M. Bainville (*Soc. intern. des Électr.*, 1905, mai 3) a déterminé expérimentalement la tension de rupture de diverses lampes à incandescence à filament de carbone établies pour la tension normale de 110 volts, et il indique les nombres suivants :

Intensité lumineuse normale, à 110 volts, en bougies décimales................	5	10	16
Tension de rupture, en volts...........	225	250	300

Les tensions inscrites dans ce Tableau sont donc des

limites extrêmes pour lesquelles les lampes ont une vie absolue pratiquement nulle.

Dans les débuts de l'éclairage électrique par incandescence, on ne considérait que la vie absolue d'une lampe, ou temps d'incandescence dans les conditions normales jusqu'à rupture du filament.

Mais on a observé qu'à tension constante l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence croît pendant les premières heures de fonctionnement, atteint un maximum, puis décroît continuellement jusqu'à la rupture du filament, époque à laquelle elle peut être inférieure à la moitié de sa valeur initiale.

Actuellement on estime qu'une lampe à incandescence doit être remplacée lorsque son intensité lumineuse a diminué d'une certaine quantité, et l'on admet généralement que la *vie utile* d'une lampe à incandescence est le temps pendant lequel elle est capable de fonctionner à la tension normale jusqu'à ce que son intensité lumineuse tombe à 80 pour 100 de sa valeur initiale, c'est-à-dire le temps pendant lequel elle perd 20 pour 100 de son intensité lumineuse initiale.

Il existe deux raisons pour limiter la vie utile d'une lampe :

1° En général, lorsqu'une lampe a perdu une certaine fraction de son intensité lumineuse initiale, elle n'est plus assez puissante pour le service qu'on lui demande;

2° Le rendement lumineux ayant diminué, le fonctionnement de la lampe devient peu économique.

Comme la vie d'une lampe diminue lorsqu'on augmente la tension de fonctionnement, le coût de remplacement de la lampe croît en même temps que le rendement, de telle sorte qu'il existe, dans chaque cas, une valeur de la tension pour laquelle le coût de l'unité de quantité de lumière est minimum. Cette valeur la plus favorable de la tension dépend du coût de l'énergie électrique et du prix d'achat de la lampe. La vie utile des lampes à filament de carbone ordinaires est, en moyenne, de 500 heures environ.

CHAPITRE II.

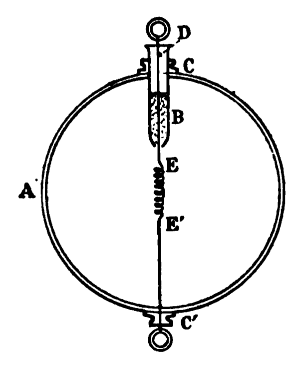
HISTORIQUE.

En 1840, Grove, l'inventeur de la pile qui porte son nom, monta une hélice en fil de platine sous les ailettes d'un radiomètre. Le fil de platine, porté à l'incandescence au moyen d'un courant électrique, constituait une lampe dont les rayons lumineux faisaient mouvoir les ailettes du radiomètre.

La première lampe à incandescence proprement dite que nous trouvons mentionnée est celle de Frédérick de Moleyns, de Cheltenham, brevetée en Angleterre en 1841.

Cette lampe se compose d'un globe de verre A (*fig.* 24),

Fig. 24.



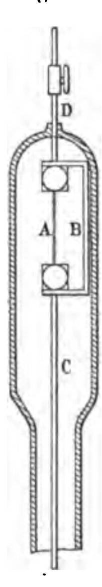
d'un tube B traversé par une tige de métal D, de deux presse-étoupe métalliques C et C', de deux hélices de platine E, E' et de deux bornes d'attache pour les conducteurs amenant le courant.

Le tube B, légèrement conique, contient du charbon pulvérisé qui, tombant grain par grain sur le fil de platine porté à l'incandescence par le passage d'un courant électrique,

brûle en produisant une vive lumière. Tous les joints sont étanches, de telle sorte qu'après quelques minutes de fonctionnement l'atmosphère, à l'intérieur du globe, devient incomburante.

Le 4 novembre 1845 fut délivré à King un brevet pour une lampe à incandescence attribuée à J. W. Starr, de Cincinnati, dont l'organe essentiel est un fil de platine ou une tige de charbon chauffés au blanc par le passage d'un courant électrique. Le brevet spécifie que, si l'on emploie le charbon, il est utile de le mettre à l'abri de l'air et de l'humidité, comme l'indique la figure 25.

Fig. 25.



La baguette de charbon de cornue A est en contact à ses deux extrémités avec des blocs conducteurs fixés à un support dont la pièce B est de porcelaine. Le courant est amené par les tiges métalliques C et D.

On remplit le tube de mercure, puis on le retourne sur une cuvette, de façon à obtenir le vide barométrique dans la partie supérieure.

En 1847, J. W. Draper fabriqua des lampes à incandescence à hélice de platine.

En 1849, Pétrie employa un fil d'iridium de 1^{mm} de diamètre et de 10^{mm} à 20^{mm} de longueur, fixé à deux supports métalliques isolés. En faisant traverser ce fil par le courant d'une batterie de piles, il obtint une belle lumière.

En juillet 1859, M. G. Farmer éclaira sa maison à la lumière électrique divisée. En 1875, il installa 42 lampes à incandescence à filament de platine alimentées par une machine électrique mue par une machine à vapeur.

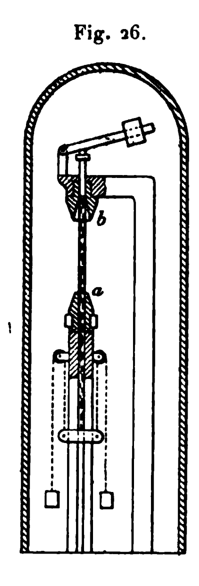
En 1873, Lodyguine, physicien russe, construisit une lampe dont le corps incandescent était formé d'un crayon de charbon dont il réduisait la section à l'endroit destiné à former le foyer lumineux, et qu'il renfermait dans un vase de verre hermétiquement clos, afin que la combustion du charbon ne s'opérât que lentement. Malgré cette précaution, la tige de charbon s'usait. Aussi la lampe comportait-elle un second crayon de charbon qu'un commutateur extérieur permettait de mettre en circuit lorsque le premier se trouvait usé.

En 1875, Konn fit breveter une lampe qui fut construite pour la première fois en France par Duboscq. Un vase de verre, de forme analogue à celle de la lampe King, renferme cinq petites tiges de charbon de cornue, verticales, dont chaque extrémité est engagée dans un petit cylindre de charbon portant aussi une tige de cuivre dans le prolongement du crayon de charbon. A la partie inférieure, les cinq tiges de cuivre, d'égale longueur, reposent sur une traverse métallique connectée à l'un des conducteurs. Les tiges de cuivre supérieures, de longueur croissante, passent dans les trous d'une traverse isolante. Un levier articulé, relié au second conducteur, vient appuyer sur l'une des tiges de cuivre. On a fait le vide dans le vase de verre au moyen d'une machine pneumatique.

Le courant, traversant la tige de charbon reliée au levier, porte celle-ci à l'incandescence; mais elle se consume peu à peu, son diamètre diminue, puis elle se rompt. Le levier tombe alors sur l'extrémité de la tige voisine et la lampe continue à fonctionner.

Dans la lampe Bouliguine (*fig.* 26), une tige métallique verticale, perforée suivant son axe, reçoit une baguette de charbon et est reliée à l'une des bornes de la lampe. Cette

Fig. 26.



tige porte sur presque toute sa longueur une fente dans laquelle coulisse une traverse qui, à l'aide de deux contrepoids, pousse le crayon de charbon de bas en haut. L'extrémité supérieure de ce crayon de charbon vient s'engager dans la cavité d'un cône de même matière porté par un support métallique relié à la seconde borne de la lampe.

Lorsque la partie *ab* du crayon est usée elle se brise. Un électro-aimant extérieur écarte les deux mâchoires de charbon qui terminent la tige creuse. En même temps, la broche de métal commandée par le levier et son contrepoids chasse la partie de la baguette engagée dans le bloc de charbon supérieur. Le crayon de charbon monte et remplace la partie usée. La lampe fonctionne ainsi avec des interruptions de très courte durée.

On peut citer, à la suite de ces premiers essais, les lampes *à contact imparfait* de Varley, de Reynier, de Werdermann, de Ducretet. Ces lampes se composent essentiellement d'un

crayon de charbon de faible diamètre dont une extrémité vient appuyer sur un bloc de charbon ou de métal. Le courant traversant ce contact imparfait porte le crayon à l'incandescence sur une partie de sa longueur. Il se forme en même temps une petite flamme autour du point de contact des deux pièces, et la chaleur dégagée est produite, en partie, par la combustion du charbon incandescent dans l'air libre.

Aucune des lampes que nous venons de décrire n'a reçu la sanction de la pratique. En outre de leur entretien compliqué, elles ont deux défauts principaux : leur rendement est en général faible et la tension à laquelle elles fonctionnent est beaucoup trop petite pour permettre une distribution économique. L'une des lampes Reynier, ayant une intensité lumineuse de 12 carcels, avait une résistance intérieure de 0,2 ohm et fonctionnait à la tension de 5,4 volts aux bornes.

Du reste, le platine ne convient pas non plus à la confection de filaments de lampes à incandescence, même si l'on appliquait les principes modernes de fabrication des lampes à incandescence. En effet, ce métal fond à 1775° C. La haute température, voisine de ce point de fusion, nécessaire pour assurer un rendement acceptable, enlèverait au filament sa rigidité et le détériorerait rapidement.

Pour nous rendre compte approximativement de la valeur qu'aurait la résistivité du platine à la température d'incandescence que nous fixerons à 1600° C., supposons que la résistivité de ce métal varie suivant la formule

$$\rho_\theta = \rho_0 (1 + 0,004\,\theta - 0,0000005\,\theta^2)$$

concordant sensiblement avec celles établies par la *Reichsanstalt* pour deux échantillons de platine entre les températures $\theta = -100°$ C. et $\theta = +500°$ C. (*Voy.* J. Rodet, Résistance, Inductance et Capacité, 1905, p. 9) et que nous admettrons applicable jusqu'à 1600° C. Nous aurons donc, en prenant pour la résistivité ρ_0 à 0° C., 11 microhms-centimètre,

$$\begin{aligned}\rho_{1600} &= 11\left(1 + 0,004 . 1600 - 0,0000005 . \overline{1600}^2\right)\\ &= 11 \times 6,12 = 67,3 \text{ microhms-centimètre.}\end{aligned}$$

Nous avons trouvé pour le filament d'une lampe de 32 bougies débitant 0,90 ampère à 110 volts une résistivité, à la température normale de fonctionnement, de 1242 microhms-centimètre.

La résistivité du platine serait donc environ 18,4 fois plus petite que celle du filament de carbone, à la température de fonctionnement.

Dans son brevet américain du 21 août 1877, Sawyer dit qu'il porte à l'incandescence un corps tel qu'un cylindre de chaux, au moyen d'un conducteur enroulé tout autour en hélice et traversé par un courant d'intensité suffisante.

En 1878, Maxim constata que la lampe à filament de platine n'est pas pratique à cause, non seulement de sa faible durée, mais aussi du prix élevé du métal.

Au milieu de février 1878, Sawyer et Man étudièrent le traitement d'une tige de charbon dans un courant de gaz d'éclairage. Ce procédé se trouve décrit dans leur patent n° 211262, du 7 janvier 1879. Ils avaient déjà, en 1878, pris un brevet en Angleterre, sous le n° 4847, lequel fut acquis par la *Edison and Swan United Electric C°*, de Londres.

Dans *Commercial Avertiser* du 23 novembre 1878, Sawyer dit qu'une année avant qu'Edison ne songeât à la lumière par incandescence, il a abandonné l'hélice de platine comme étant inutilisable et qu'il a employé le charbon.

L'opinion de Maxim et de Sawyer, contraire à l'emploi du platine, concorde avec les résultats d'expériences publiés par J. W. Draper, en 1847, dans *Sillisman's Journal* et dans *Phil. Magazine*.

Le 6 mars 1878, Sawyer et Man constatèrent que, si l'on soumettait à une force électromotrice suffisante une feuille de papier sur laquelle on a tracé un trait de crayon, il se carbonisait suivant ce trait. Ils eurent alors l'idée de carboniser, à l'aide du courant d'une dynamo, un ruban de papier placé dans une atmosphère de gaz d'éclairage. Comme le ruban se contractait irrégulièrement pendant cette opération, ils lui donnèrent la forme d'un fer à cheval. Ils obtinrent, de la sorte, des conducteurs de charbon pratiquement utilisables.

Plus tard, Sawyer et Man carbonisèrent ces rubans de papier en forme de fer à cheval, dans un vase de fer et noyés

dans de la poudre de graphite. Ils expérimentèrent différentes sortes de papier et de bois dont ils firent des filaments de formes diverses : filaments rectilignes, en arc, en V, etc.

Le *New York Times* du 19 mars 1878 décrit l'une de ces lampes à filament court, formé d'une substance tenue secrète. Au mois de juin de la même année ils firent fonctionner des lampes de 100 à 200 bougies pendant plusieurs jours et même plusieurs semaines.

Au mois d'octobre 1879, ils exposèrent, dans leur laboratoire de New-York, des lampes à filament de papier et de bois carbonisés. Ils avaient déjà constaté, à cette époque, que le filament durait plus longtemps lorsque l'ampoule de verre avait été privée d'air au moyen d'une pompe à vide.

Au commencement de 1879, Alfred Niaudet, en France, reconnut que le charbon était supérieur au platine.

Le 5 octobre 1878, Edison déposa sa première demande de brevet en Amérique (n° 214636) pour une hélice de platine incandescente. Jusqu'à la fin de 1878 on trouve qu'Edison poursuit uniquement l'idée d'employer le platine et l'iridium. Dans le *New York Herald* du 11 décembre 1878, il écrit qu'il n'emploie pas le charbon (I use no carbon) et que le seul corps convenable, pour le filament incandescent, est un fil de métal.

Vers la fin de 1878, Batchelor fabriqua des filaments avec du papier, avec des tissus, avec du papier enduit de noir de fumée et de goudron. Il enroulait le ruban en hélice sur une aiguille à tricoter, puis il le carbonisait. Ces filaments étaient alors montés dans une ampoule de verre dans laquelle on faisait le vide, et on les portait à l'incandescence par le passage d'un courant. Ils ne duraient qu'une heure ou deux.

A cette époque, Edison s'adjoignit, comme collaborateur, M. F.-R. Upton, qui démontra par le calcul qu'une lampe à incandescence doit avoir une résistance d'au moins 100 ohms, pour que le coût de la canalisation ne soit pas excessif. Il essaya des hélices de platine dans un vide très élevé obtenu au moyen de la pompe Sprengel.

Edison déposa alors le 21 avril 1879 une demande de brevet en Amérique, qui fut accordé le 4 mai 1880 sous le n° 227229, dans laquelle se trouve décrite une lampe dont le corps incandescent est formé d'un cylindre de chaux, portant

enroulé en hélice un fil de platine de $0^{mm},127$ de diamètre et de $9^{m},15$ de longueur, dont la résistance à la température d'incandescence est de 750 ohms. L'adoption d'une résistance élevée était un pas important, mais le brevet se trouve anticipé par celui de Sawyer du 21 août 1877.

En 1879, Edison fabriqua des lampes à filament de papier, de fil à coudre, carbonisé, puis monté dans une ampoule de verre, dans laquelle il faisait, au moyen de la pompe Sprengel, un vide d'environ 1 millionième d'atmosphère. Les conducteurs amenant le courant au filament étaient scellés au chalumeau dans le verre. Mais ces filaments étaient fragiles. Il essaya alors des filaments obtenus en carbonisant des fibres extraites d'une feuille de bambou du Japon, lesquels donnèrent des résultats bien supérieurs et qu'il adopta pour la fabrication des lampes. En 1880, il carbonisa les filaments dans une atmosphère de gazoline.

Une réclame du *New York Herald* du 21 décembre 1879 annonce qu'Edison produit de la lumière au moyen d'un morceau de papier (scrap of paper), d'un fil de coton (cotton thread).

Le 11 décembre 1879, Edison déposa une demande de brevet en Amérique, dans laquelle il dit qu'il préfère le carton Bristol comme matière première pour la fabrication des filaments, invention faite antérieurement par Sawyer et Man.

Le 23 septembre 1880, la *Electrodynamic Light Company*, propriétaire de l'invention de Sawyer et Man, formula une revendication contre le brevet d'Edison. Sawyer et Man firent la preuve qu'ils avaient fait déjà, en automne 1878, les inventions faisant l'objet du brevet d'Edison. Le 24 juillet 1882, le différend fut repris, et le 2 juin 1883 il fut tranché par le bureau des brevets qui attribua la priorité de l'invention à Sawyer et Man. Edison en appela de ce jugement, mais il fut débouté. Il fut donc prouvé que Sawyer et Man étaient les premiers inventeurs d'une lampe à incandescence dont le corps lumineux est formé de papier carbonisé.

On doit toutefois reconnaître que, si Edison n'est ni le seul ni le premier inventeur de la lampe à incandescence à filament de carbone, c'est lui qui, pratiquement, a introduit l'éclairage électrique par incandescence dans le domaine industriel, en faisant en 1879 l'installation de l'éclairage du vapeur

Colombia, comprenant 115 lampes à incandescence alimentées par 3 dynamos excitées par une quatrième machine.

Edison organisa, en 1880, une exposition à Menlo-Park. La même année fut fondée, à New-York, la *Edison Electric Illuminating Company,* qui demanda, au mois de décembre de la même année, la concession d'une distribution par usine centrale. Sur ces entrefaites fut créée la *Compagnie Edison* pour éclairage par distributions isolées qui installa, jusqu'en juin 1882, 10424 lampes. L'usine centrale de New-York fut terminée en automne 1882 et inaugurée le 4 septembre avec 2323 lampes réparties dans 85 bâtiments. En avril 1884, le nombre des lampes s'éleva à 11272 réparties entre 500 maisons, tandis qu'à cette époque on avait monté 307 installations isolées comprenant ensemble 59173 lampes.

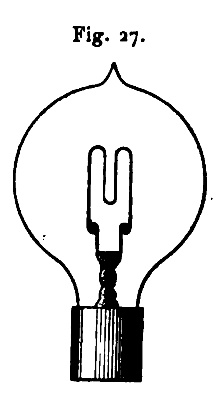
Au mois de novembre 1880, fut installée la fabrique de lampes Edison de Menlo-Park, qui fut transférée, le 1er avril 1882, à East Newark, N. J.

Les lampes Edison avaient un culot et une douille à vis.

Les lampes à incandescence étaient abondamment représentées à l'Exposition d'Électricité de Paris en 1881.

La *Compagnie Swan* adopta, pour fabriquer le filament de ses lampes à incandescence, un fil de coton à coudre parcheminé dans l'acide sulfurique, puis carbonisé.

Fig. 27.



Maxim constituait le filament de ses lampes au moyen d'un étroit ruban de papier bristol, auquel il donnait approximativement la forme d'un M (*fig.* 27).

De Khotinsky fabriquait le filament de ses lampes avec du collodion ou de la gélatine. A cet effet, il laminait ces substances de façon à obtenir des feuilles minces qu'il découpait mécaniquement en rubans étroits. Ceux-ci étaient mis sous la forme convenable, puis carbonisés.

La lampe Cruto ne diffère pas à première vue, dans ses parties essentielles, des lampes Edison ou Swan, mais son filament est fabriqué d'une façon toute spéciale.

On prend un fil de platine qu'on recouvre électrolytiquement d'un dépôt d'argent relativement épais. Puis on étire à la filière ce fil métallique jusqu'à ce qu'on obtienne un diamètre de $\frac{1}{10}$ de millimètre. On dissout alors la gaine d'argent dans un bain d'acide azotique qui respecte l'âme de platine (procédé Wollaston). On opère de façon que le fil de platine ainsi obtenu ait $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre. On le coupe à la longueur voulue, on le courbe en U, et on l'introduit dans une ampoule dans laquelle on fait circuler un courant d'hydrocarbure gazeux, tandis qu'on lance dans le fil un courant électrique suffisant pour le faire rougir. L'hydrocarbure se décompose au contact du fil rouge, et celui-ci se recouvre d'une gaine mince de carbone pur. L'opération dure 2 à 3 heures pour donner au filament le diamètre voulu.

On soude alors le filament à deux fils de platine au moyen d'un dépôt de charbon, puis on l'introduit dans son ampoule. On fait le vide et l'on scelle la lampe au chalumeau.

Voici quelques indications fournies par M. Desroziers, sur des lampes Cruto de différentes intensités lumineuses, du type de 1884.

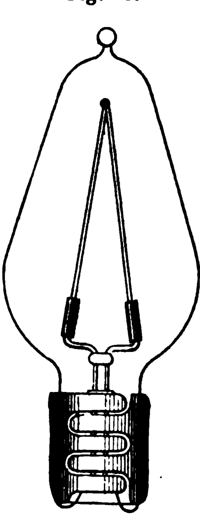
	INTENSITÉ LUMINEUSE EN BOUGIES.					
	4.	8.	12.	16.	50.	100.
Tension, en volts.....	5	10	50	50	50	100
Courant, en ampères..	2,8	2,8	0,85	1,05	2,25	2,25
Watts par bougie....	3,5	3,5	3,5	3,15	2,25	2,25

Dans les débuts, ces lampes étaient donc à faible tension.

Une lampe Cruto de 8 bougies, de fabrication moins ancienne, fonctionnant à 52 volts, avait un filament de $0^{mm},1$ de diamètre et de 150^{mm} de longueur.

Le filament de la lampe A. Gérard (*fig.* 28) est formé de deux fines tiges de charbon obtenues en filant à la presse une pâte de charbon, que l'on assemble en V au moyen d'une

Fig. 28.



gouttelette de pâte composée de poudre de charbon et d'une substance adragante. Les extrémités libres des tiges sont encastrées et fixées à l'aide du même ciment dans de petits cylindres de charbon, montés sur les fils de platine amenant le courant. Ces derniers sont noyés dans une tige d'émail que l'on soude au col de l'ampoule dans laquelle on fait ensuite le vide. Les fils de platine sont fixés, à leur sortie, à deux demi-colliers de cuivre qui s'adaptent par simple serrage au col de l'ampoule. La douille de la lampe est formée de deux pinces de cuivre élastiques.

Voici quelques données, suivant M. Gérard, sur différentes lampes du type de 1885.

	INTENSITÉ LUMINEUSE EN BOUGIES.			
	10.	25.	50.	200.
Tension, en volts	16 à 18	25	30	35
Courant, en ampères	1,5	2	2,5	7
Puissance absorbée, en watts	25	50	75	245
Watts par bougie	2,5	2	1,5	1,225

En raison de leur mode de construction ces lampes avaient nécessairement un filament de diamètre relativement fort et de faible longueur, et étaient, par suite, à très basse tension. Aussi leur application était-elle limitée aux distributions locales, ou bien elles devaient être montées par groupes de plusieurs lampes en série, dans un lustre par exemple.

La lampe Edison de 16 candles, de 1881, consommait 5,8 watts par candle horizontale. Les lampes de 16 bougies actuelles sont réglées en général à 3,5 et même à 3,3 watts par bougie horizontale. Le prix d'une lampe à incandescence, qui était au début supérieur à 5 francs, est tombé au-dessous de $0^{fr},50$. L'abaissement du prix de revient est dû en majeure partie à l'augmentation considérable de la production et à la substitution partielle du travail mécanique au travail manuel.

On a réduit la consommation spécifique en perfectionnant la fabrication du filament qui est actuellement plus uniforme, à surface plus lisse. La fixation du filament sur les fils d'amenée du courant a été améliorée. Ces perfectionnements ont permis de pousser quelque peu les lampes et, par suite, d'augmenter leur rendement lumineux.

Dans ces dernières années on s'est efforcé d'accroître le rendement des lampes à incandescence en augmentant la température du filament. Le charbon étant mis rapidement hors d'usage aux températures très élevées nécessaires, on a cherché des substances qui fussent capables de supporter ces hautes températures pendant un temps suffisamment long. A cet effet, on a étudié et expérimenté un certain

nombre de métaux à point de fusion extrêmement élevé, tels que l'osmium, le vanadium, le niobium, le tantale, le zirconium, le molybdène, le tungstène, ainsi que des oxydes et des mélanges d'oxydes éminemment réfractaires.

Les premiers résultats pratiques obtenus par M. Auer von Welsbach avec l'osmium datent à peu près du commencement de 1899. La consommation spécifique indiquée pour les lampes à filament d'osmium est de 1,5 watt par hefner horizontal.

Le vanadium, le niobium et le tantale ont été étudiés par la Société Siemens et Halske en vue de la fabrication de filaments de lampes à incandescence. C'est le tantale qui a été adopté, principalement à cause de son point de fusion très élevé. La lampe à filament de tantale est le résultat des recherches de MM. von Bolton et Feuerlein. La lampe de 25 hefners horizontaux à 110 volts a fait son apparition dans le commerce en 1905. Elle consomme, d'après le constructeur, 1,5 watt par hefner horizontal.

On a fabriqué aussi des lampes à filament de zirconium. Ce métal possède la cassure cristalline et la couleur de l'antimoine. Sa densité est 4,15. Il est assez répandu dans la nature, principalement à l'état de silicate de zirconium.

Pour fabriquer le filament on mélange l'oxyde de zirconium avec du magnésium et l'on porte le tout à une haute température dans un courant d'hydrogène. On obtient ainsi l'hydrure de zirconium sous forme de poussière à facettes. On en fait une pâte homogène, en l'agglomérant avec une solution de cellulose, que l'on file à la presse. On coupe ce fil en morceaux auxquels on donne la forme convenable, et que l'on carbonise dans une atmosphère privée d'oxygène. Puis on achève l'agglomération et le durcissement du filament en le portant graduellement à une incandescence de plus en plus élevée par le passage d'un courant. Le filament, noir au début, prend peu à peu un aspect métallique.

Un kilogramme de zirconium suffit à fabriquer environ 100000 filaments.

L'incandescence normale du filament correspond à la consommation spécifique de 2 watts par hefner. Les lampes

à filament unique sont établies pour 37 volts. On monte donc trois lampes en série sur 110 volts. Pour les intensités lumineuses de 60 à 100 hefners on fabrique des lampes à plusieurs filaments pour 110 volts. La vie des lampes à filament de zirconium actuelles serait de 700 à 1000 heures.

Le professeur Walther Nernst déposa sa première demande de brevet sur le principe de sa lampe en 1897. Le corps lumineux, qui affecte la forme d'une petite tige cylindrique droite, est constitué par un mélange de terres rares ou oxydes éminemment réfractaires : oxydes d'erbium, d'yttrium, de zirconium, de magnésium, de thorium, de cérium. Ces substances n'étant conductrices qu'à chaud, l'allumage de la lampe exige un dispositif spécial pour le chauffage du bâtonnet à la mise en circuit.

Contrairement aux lampes à incandescence précédentes, dont le filament est dans le vide, la lampe Nernst fonctionne à l'air libre.

La consommation spécifique de la lampe Nernst de 25 hefners est d'environ 2 watts par hefner dans la direction de l'intensité lumineuse maximum.

M. John Howell a eu l'idée de graphiter le filament de carbone des lampes à incandescence en le cuisant à une très haute température dans un four électrique. Ce nouveau filament a fait l'objet d'un mémoire présenté par M. John Howell au congrès de l'Institut américain des Ingénieurs électriciens à Asheville en 1905.

Les nouvelles lampes à incandescence dites à filament de carbone *métallisé* sont fabriquées par la *General electric Company*. La consommation spécifique indiquée est de 2,5 watts par candle horizontale.

Depuis quelque temps plusieurs inventeurs, parmi lesquels nous citerons MM. Just, Hanamann, Kuzel et la Société Auer v. Welsbach, cherchent à utiliser, pour la confection des filaments de lampes à incandescence, deux métaux éminemment réfractaires : le molybdène et particulièrement le tungstène. D'après les documents publiés sur ces recherches, les résultats obtenus actuellement seraient fort intéressants.

Les principaux minerais du molybdène sont : la molybdénite (Suède, Norvège, Saxe), ressemblant par son aspect et son éclat à la plombagine avec laquelle elle fut anciennement confondue, et dont Scheele retira, en 1778, l'acide molybdique; le sulfure de molybdène et le molybdate de plomb (Bavière).

Wœhler isola le métal en chauffant au rouge le chlorure de molybdène dans un courant d'hydrogène. Il obtint un corps brillant, un peu plus clair que l'acier. Uslar et Debray réduisirent l'acide molybdique en le chauffant dans un courant d'hydrogène.

Debray parvint à fondre le métal pulvérulent ainsi obtenu dans un creuset de charbon, logé lui-même dans un creuset de chaux vive chauffé par le chalumeau oxhydrique à une température bien supérieure au point de fusion du platine. Mais, dans cette opération, le métal fixait 3 à 4 pour 100 de carbone qui facilitait probablement la fusion. Dans cet état, le métal est blanc comme l'argent et très dur, il raye le verre et la topaze; sa densité est de 8,6.

A l'état pulvérulent il a une chaleur spécifique de 0,0722. Son poids atomique est 96.

L'acide tungstique a été découvert en 1781 par Scheele qui le retira d'un minéral suédois, *tungstein* ou *schwerstein,* qui est du tungstate de calcium. En 1785, les frères d'Elhuyart réussirent à extraire le même produit du *wolfram,* ou tungstate de fer et de manganèse, que l'on rencontre en Bohême, en Saxe, en Angleterre, en France et dans l'Amérique du Nord.

On obtient le métal en réduisant l'acide tungstique ou le tungstate acide de potassium par l'hydrogène au rouge vif. Le tungstène se présente alors sous la forme d'une poudre métallique plus réfractaire que le molybdène. Il ne fond au chalumeau oxhydrique qu'en se carburant, ou dans l'arc électrique. Sa densité est 18, son poids atomique 184 et sa chaleur spécifique 0,0334.

D'après des recherches récentes, le tungstène pur a une couleur gris de fer; il est très dur et raye le verre; sa densité est 19,1 et son poids atomique 184. Suivant les inventeurs autrichiens, le tungstène pur ne fond pas; comme le carbone, il se volatilise sans passer par l'état liquide, mais à une tem-

pérature supérieure à celle de volatilisation de ce dernier corps.

Comme l'osmium et le tantale, il a une résistivité inférieure à celle du carbone. Son emploi pour la fabrication des lampes à incandescence de tension ordinaire présente donc les mêmes difficultés que celui de ces deux autres métaux.

Suivant M. F. Ross, la première application du tungstène aux filaments de lampes à incandescence électriques remonte à la demande de brevet de M. Just en date du 14 avril 1903. Il porte un filament de carbone à une haute température, à l'aide d'un courant électrique, dans une vapeur de combinaison oxyhalogénée de tungstène, ou de molybdène, en présence d'un peu d'hydrogène libre : le tungstène, ou le molybdène, se substitue au carbone. Ce procédé ne semble pas avoir donné de résultat pratique.

Dans une autre demande de brevet, en date du 3 février 1905, M. Just décrit un procédé différent consistant à agglomérer, à l'aide d'un liquide dépourvu de carbone et ne laissant aucun dépôt, tel que l'eau, des combinaisons du tungstène, ou du molybdène, avec l'oxygène, le soufre, le chlore, en poudre fine. On file la pâte à la presse et l'on réduit le fil à l'état métallique par l'hydrogène.

Il est indispensable d'éviter d'introduire du carbone qui, en se combinant au métal, abaisserait le point de fusion de celui-ci.

M. H. Kuzel réduit le tungstène, ou le molybdène, à l'état colloïdal, par exemple par le procédé de Bredig consistant à faire passer un arc électrique entre deux électrodes du métal dans l'eau. Après l'opération, on trouve le métal extrêmement divisé en suspension dans l'eau. On le recueille et l'on file la pâte à la presse. Le fil est alors séché entre 60° C. et 80° C. pendant 5 ou 10 minutes. Dans cet intervalle de température il devient conducteur, mais il perd sa conductibilité en se refroidissant, on le place alors à l'intérieur d'un vase dans lequel on fait le vide ou que l'on remplit d'un gaz sans action sur le métal, tel que l'hydrogène, et on le chauffe entre 60° C. et 80° C. pour le rendre conducteur, puis on le porte au blanc par le passage d'un courant électrique. Il prend une texture cristalline, son diamètre diminue et sa résistivité décroît. Le filament est prêt à être employé dans la fabrication de la lampe.

La Société Auer von Welsbach (brevet autrichien du 15 mars 1906) agglomère le trioxyde ou l'hydrate acide de tungstène, ou de molybdène, en le broyant avec un excès d'ammoniaque, de façon à obtenir une pâte que l'on file à la presse, puis que l'on réduit à l'état métallique.

Les premières lampes au tungstène étaient établies pour très faible tension, 20 ou 30 volts. D'après les renseignements publiés, on serait parvenu à fabriquer des lampes au tungstène de 32 hefners à 110 volts, consommant environ 1 watt par hefner et ayant une vie voisine de 1000 heures pendant laquelle la diminution de l'intensité lumineuse serait peu importante.

L'idée de la lampe à vapeur de mercure est assez ancienne.

En 1860, Way remarqua qu'un courant passant par un mince filet de mercure tombant d'un réservoir supérieur dans un second produisait une lumière intense. Le mercure était volatilisé par le courant et donnait naissance à un arc. Way avait installé cette lampe sur le mât d'un yacht au large de l'île de Wight. Cette lumière brillante était visible à une distance de plusieurs milles.

En 1879, Rapieff prit un brevet en Angleterre pour un tube en U renversé dont les extrémités plongeaient dans des cuvettes contenant du mercure et reliées à une source d'électricité. L'arc se produisait soit dans l'air, soit dans le vide; on l'amorçait en secouant le tube.

En 1880, Rizet prit un brevet français pour un dispositif semblable au précédent, sauf que le tube était rempli d'azote.

Jamin et Manœuvrier découvrirent, en 1882, qu'une tension alternative est capable de maintenir un arc entre une électrode de charbon et une électrode de mercure, et qu'il se produit un redressement du courant.

En 1892 et 1896, Arons décrivit sa lampe formée d'un tube en U renversé dont les extrémités, fermées, renferment du mercure dans lequel pénètrent des fils de platine soudés dans le verre et amenant le courant aux électrodes de mercure. On a pratiqué dans le tube un vide très élevé.

C'est M. Cooper Hewitt qui, le premier, est parvenu à con-

struire une lampe à vapeur de mercure donnant des résultats réellement pratiques.

Le premier brevet relatif à la lampe Cooper Hewitt à vapeur de mercure date de l'année 1900. Cette lampe se compose essentiellement d'un long tube de verre dans lequel on a fait le vide, portant à chacune de ses extrémités une électrode dont l'une est constituée par une cuvette de mercure et l'autre par une petite coupe de fer ou un cylindre de charbon. Après amorçage le tube se remplit de vapeur de mercure qui devient lumineuse par le passage du courant allant du fer au mercure. Jusqu'à ces derniers temps la lampe Cooper Hewitt était construite seulement pour courant continu; mais depuis 1906 on l'établit également pour courant alternatif.

Son rendement lumineux est relativement très élevé. La consommation spécifique accusée est de 0,55 à 0,64 watt par bougie.

CHAPITRE III.

LAMPE A FILAMENT DE CARBONE.

I. — Détermination des dimensions du filament.

Une lampe à incandescence a à remplir, en général, quatre conditions :

1° Le filament doit avoir une grande résistance afin que la lampe puisse fonctionner sur une distribution d'au moins 100 à 120 volts. Exceptionnellement cette condition ne s'applique pas à certaines lampes spéciales, telles que les lampes portatives, celles pour l'éclairage des voitures de chemin de fer, alimentées par une batterie d'accumulateurs;

2° Il est nécessaire que le filament soit placé dans un vide très élevé, tout d'abord pour qu'il soit soustrait à l'action de l'oxygène qui le brûlerait, et en second lieu pour qu'il ne subisse pas de refroidissement sensible par conduction de la chaleur que produirait un gaz quelconque, perte de chaleur qui pourrait abaisser considérablement le rendement de la lampe;

3° Il faut que le filament soit très uniforme sur toute sa longueur, car, si sa résistance ou sa section n'étaient pas constantes en tous les points, des parties s'échaufferaient plus que les autres, s'useraient plus rapidement, et amèneraient la rupture prématurée du filament;

4° Enfin la surface du filament doit être aussi polie que possible afin que son émission soit sélective.

M. Uppenborn a indiqué la résistivité de différentes sortes de charbon, à la température ordinaire, en la rapportant à celle du mercure comme unité. Nous reproduisons ci-dessous le Tableau de M. Uppenborn en exprimant les résistivités en microhms-centimètre.

Nous verrons plus loin que le rapport $\frac{I^2}{r^3}$ du carré du courant employé dans le traitement au cube du rayon du filament est en quelque sorte une mesure de la température à laquelle a été fait ce traitement.

SORTE DE CHARBON.	RÉSISTIVITÉ à la température ordinaire en microhms-centimètre.
Fibre de bambou carbonisée...................	5885
Fibre de bambou traitée : $\frac{I^2}{r^3} =$ 500	4703
Fibre de bambou traitée : $\frac{I^2}{r^3} =$ 820..........	2728
Charbon de cornue chimique pour gros filaments.	674
Charbon de collodion non traité	3753
Charbon de collodion traité : $\frac{I^2}{r^3} = 1100$.........	2070

Considérons une lampe à incandescence ayant une intensité lumineuse B bougies à la tension E volts pour laquelle elle absorbe un courant I ampères, reconnue satisfaisante au point de vue de la consommation spécifique et de la durée. Le filament a un diamètre $d = 2r^{mm}$ et une longueur l^{mm}. La consommation par bougie est

$$p = \frac{EI}{B} \text{ watts.} \tag{1}$$

Nous voulons fabriquer une autre lampe ayant une intensité lumineuse B′ bougies à la tension E′ volts, avec la même consommation spécifique que la précédente. Soit I′ le courant absorbé, $d' = 2r'$ le diamètre et l' la longueur du filament. On a tout d'abord

$$\frac{E'I'}{B'} = \frac{EI}{B}, \tag{2}$$

d'où l'on tire

$$I' = I \frac{E}{E'} \frac{B'}{B} \text{ ampères.} \tag{3}$$

La surface du filament de la lampe prise comme type est

$$S = 2\pi r l \text{ mm}^2. \tag{4}$$

La surface incandescente par bougie est donc

$$(5) \qquad \frac{S}{B} = \frac{2\pi r l}{B}.$$

Or, toutes les lampes dont le filament est composé de matière identique et ayant la même consommation spécifique doivent avoir la même surface rayonnante par bougie et la même température pour le filament incandescent. En effet, si ces conditions sont remplies, la puissance électrique par bougie $\left(\frac{EI}{B}\right)$, constante pour toutes ces lampes, se divisera toujours dans le même rapport en puissance lumineuse et en puissance calorifique.

La surface rayonnante du filament de la lampe projetée étant

$$(6) \qquad S' = 2\pi r' l' \,\text{mm}^2,$$

on devra avoir

$$(7) \qquad \frac{S'}{S} = \frac{r' l'}{rl} = \frac{B'}{B}.$$

Si nous appelons ρ_θ la résistivité en microhms-centimètre du carbone à la température de fonctionnement θ, la résistance du filament type est

$$(8) \qquad R = \frac{\rho_\theta 10^{-6} l 10^{-1}}{\pi r^2 10^{-2}} \text{ ohms},$$

et celle du filament projeté

$$(9) \qquad R' = \frac{\rho_\theta 10^{-6} l' 10^{-1}}{\pi r'^2 10^{-2}} \text{ ohms},$$

Les courants I et I′ ont alors pour expression

$$(10) \qquad I = \frac{E\pi r^2 10^5}{\rho_\theta l}$$

et

$$(11) \qquad I' = \frac{E'\pi r'^2 10^5}{\rho_\theta l'}.$$

On a, par suite,

$$\frac{I'}{I} = \frac{E'}{E}\,\frac{r'^2}{r^2}\,\frac{l}{l'}. \tag{12}$$

Or, on tire de (7)

$$\frac{r'}{r} = \frac{B'}{B}\,\frac{l}{l'}. \tag{13}$$

Dès lors (12) prend la forme

$$\frac{I'}{I} = \frac{E'}{E}\,\frac{B'^2}{B^2}\,\frac{l^3}{l'^3}. \tag{14}$$

D'autre part (3) et (14) donnent

$$\frac{E}{E'}\,\frac{B'}{B} = \frac{E'}{E}\,\frac{B'^2}{B^2}\,\frac{l^3}{l'^3}, \tag{15}$$

d'où l'on tire

$$l' = l\sqrt[3]{\frac{E'^2}{E^2}\,\frac{B'}{B}}. \tag{16}$$

Cette valeur portée dans (13) donne

$$r' = r\sqrt[3]{\frac{E^2}{E'^2}\,\frac{B'^2}{B^2}} \tag{17}$$

ou

$$r' = r\sqrt[3]{\left(\frac{E}{E'}\,\frac{B'}{B}\right)^2} \tag{18}$$

ou encore

$$d' = d\sqrt[3]{\left(\frac{E}{E'}\,\frac{B'}{B}\right)^2}. \tag{19}$$

On tire de la relation (3)

$$\frac{I'}{I} = \frac{E}{E'}\,\frac{B'}{B}$$

et de la relation (18)

$$\frac{r'^3}{r^3} = \left(\frac{E}{E'}\,\frac{B'}{B}\right)^2$$

et, par suite,

(20) $$\frac{I'^2}{I^2} = \frac{r'^3}{r^3}$$

ou

(21) $$\frac{I'^2}{r'^3} = \frac{I^2}{r^3} = \text{const.}$$

Cette dernière relation peut s'écrire

(22) $$\frac{\left(\frac{I'^2}{r'^2}\right)}{r'} = \frac{\left(\frac{I^2}{r^2}\right)}{r}.$$

Puisque les deux filaments sont composés de matière identique, ayant même résistivité, et qu'ils sont à la même température, les numérateurs des rapports ci-dessus sont proportionnels à la puissance électrique par unité de longueur de filament, tandis que les dénominateurs sont proportionnels à la surface rayonnante de l'élément considéré. La relation (21) exprime donc la condition que pour tous les filaments de matière identique et ayant la même consommation spécifique la surface rayonnante par watt dépensé est la même.

Le Tableau de la page 76 indique, pour la fibre de bambou traitée, deux résistivités correspondant respectivement aux régimes de traitement $\frac{I^2}{r^3} = 500$ et $\frac{I^2}{r^3} = 820$. Dans le second régime le courant employé est supérieur de 28 pour 100 au courant du premier régime. Le filament a donc été porté à une température très notablement plus élevée ; la décomposition du charbon a été plus complète et sa purification par volatilisation des substances étrangères, plus parfaite. Enfin le carbone a probablement subi une graphitation partielle. Ces différents effets ont eu comme résultat d'abaisser la résistivité de la matière de 4703 à 2728 microhms-centimètre.

Le filament de charbon de collodion traité à un régime encore plus élevé $\frac{I^2}{r^3} = 1100$ a acquis une résistivité encore plus faible, égale à 2070 microhms-centimètre.

Voici quelques valeurs que nous avons trouvées pour une lampe à filament de carbone, de fabrication moderne, provenant d'une grande usine française :

Intensité lumineuse horizontale, en bougies-décimales.	32
Tension aux bornes, en volts	110
Courant, en ampères	0,90
Consommation spécifique, en watts par bougie......	3,1
Diamètre du filament, en millimètres	0,18
Longueur du filament »	250
Résistance du filament, à la température de fonctionnement normal, en ohms	122
Résistance du filament, à 0°C., en ohms	250
Résistivité du carbone du filament, à la température de fonctionnement normal, en microhms-centimètre..	1242
Résistivité du carbone du filament à 0°C., en microhms-centimètre	2545
Surface totale du filament, en millimètres carrés....	142
Surface rayonnante par bougie, en millimètres carrés.	4,43

On a pour cette lampe

$$\frac{I^2}{r'^2} = \frac{\overline{0,9}^2}{\overline{0,09}^3} = 1110.$$

Déterminons, d'après cette lampe, le filament d'une lampe de 16 bougies à 120 volts devant avoir la même consommation spécifique de 3,1 watts par bougie horizontale.

La lampe projetée absorbera une puissance

$$3,1 \times 16 = 49,6 \text{ watts}$$

et un courant

$$\frac{49,6}{120} = 0,414 \text{ ampère.}$$

Le diamètre du filament sera

$$d' = 0,18 \sqrt[3]{\left(\frac{110}{120}\,\frac{16}{32}\right)^2} = 0,1079 \text{ millimètre}$$

et sa longueur

$$l' = 250 \sqrt[3]{\frac{\overline{120}^2}{\overline{110}^2}\,\frac{16}{32}} = 210 \text{ millimètres.}$$

Le carbone possède, au moins sur une échelle de températures très étendue, un coefficient de température négatif, c'est-à-dire que sa résistivité diminue lorsque la température augmente.

Le Tableau ci-après renferme quelques valeurs indiquées par M. Le Chatelier pour le rapport $\frac{R_\theta}{R_0}$ de la résistivité du filament d'une lampe à incandescence à la température $\theta°$ à sa résistivité à la température de la glace fondante.

Température θ en degrés centigrades.	Rapport $\frac{R_\theta}{R_0}$.
15	1
700	0,75
1000	0,66
1400	0,57
1800	0,49
2100	0,44

Nous déduisons des nombres de ce Tableau que le rapport $\frac{R_\theta}{R_0}$ peut être représenté par la formule empirique

$$\frac{R_\theta}{R_0} = 1 - 0,0004\,\theta + 0,000000062\,\theta^2.$$

Le carbone est l'un des plus réfractaires des corps connus. M. Violle a trouvé que la capacité calorifique du graphite au-dessus de 1000°C. croît linéairement avec la température suivant la formule

$$C_\theta = 0,355 + 0,00006\,\theta.$$

La quantité de chaleur cédée par 1^g de graphite solide depuis sa température de volatilisation jusqu'à 0°C. est 2050 calories-gramme. Or, la quantité de chaleur emmagasinée par 1^g de graphite à la température d'ébullition θ_e a pour expression

$$Q = 0,355\,\theta_e + 0,00006\,\theta_e^2 \text{ calories-gramme},$$

relation qui donne pour la température d'ébullition θ_e du carbone 3600°C.

II. — Fabrication des lampes à filament de carbone.

1° *Fabrication primitive des lampes à incandescence.*

Une lampe à incandescence à filament de carbone se compose de quatre parties principales qui sont :

1° Le *filament* ou corps lumineux;

2° Les *fils d'amenée* du courant au filament;

3° L'*ampoule* de verre qui sert d'enveloppe protectrice au filament et permet de le loger dans le vide;

4° Le *culot*, pièce scellée à la base de l'ampoule, qui vient s'engager dans la *douille* ou support de la lampe et établit la connexion avec la canalisation. Le culot porte deux contacts métalliques auxquels sont soudés les fils d'amenée du courant au filament et qui correspondent à deux pièces métalliques de la douille reliées aux deux conducteurs de la distribution. Lorsqu'on fixe la lampe dans sa douille le filament se trouve ainsi connecté aux fils de la canalisation.

Nous avons vu que le filament des premières lampes à incandescence industrielles était formé d'un ruban de papier, d'une fibre de bambou ou d'un fil de coton carbonisés. Le fil

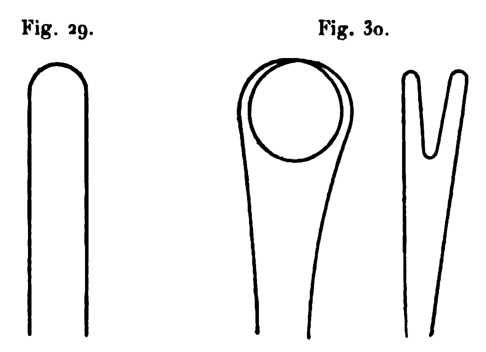


Fig. 29. Fig. 30.

de coton fournissant un filament plus uniforme et plus économique que les matières précédentes fut bientôt adopté d'une façon à peu près générale. On a donné au fil un diamètre constant en le passant à la filière. Pour le rendre plus homogène on l'a parcheminé dans l'acide sulfurique.

On coupe le fil en morceaux de longueur convenable, notablement supérieure à celle que doit avoir le filament terminé; puis on courbe ces éléments, au fer chaud, soit en fer à cheval (*fig.* 29), soit en boucle simple ou multiple (*fig.* 30). Les premières lampes Edison avaient un filament en fer à cheval. Afin de réduire les dimensions de l'ampoule on a adopté, pour les lampes de tensions usuelles, le filament à une ou à plusieurs boucles.

On place ces fils dans un creuset de terre réfractaire en les noyant dans de la poudre de charbon. Les fils en boucles sont mis préalablement sur une forme de coke (*fig.* 31). On

Fig. 31.

lute le couvercle et l'on chauffe le creuset au blanc pendant 5 à 12 heures. Plus la température de carbonisation est élevée, plus est complète la décomposition de la cellulose et meilleur est le résultat de l'opération. Le chauffage au gaz permet d'obtenir le plus facilement le réglage de la température. Un creuset contient de 300 à 500 filaments.

Lorsque le creuset est refroidi on retire les filaments, que l'on débarrasse de la poussière de charbon adhérant à leur surface, en leur imprimant des secousses sur un appareil analogue à un tympan de tambour. Puis on classe les filaments par catégories, d'après leur diamètre et leur longueur. Le déchet peut atteindre 75 pour 100 des fils soumis à la carbonisation.

Le filament fourni par une fibre végétale a ordinairement, après carbonisation, un diamètre égal aux $\frac{4}{5}$ de celui de la fibre.

De Khotinsky a substitué aux diverses fibres végétales des substances carbonées plastiques homogènes, la gélatine et le collodion, laminées en feuilles minces, puis découpées méca-

niquement en rubans très étroits. Ce mode de fabrication forme en quelque sorte la transition entre les premiers procédés de fabrication au moyen de fibres végétales et le procédé moderne de la cellulose dissoute.

Le filament carbonisé brut est alors soumis au traitement à l'hydrocarbure.

Au début, Edison pensait que le filament devait être fixé sur les fils de platine avant le traitement. Il aplatissait l'extrémité du fil de platine et y fixait le filament au moyen d'une ligature formée d'un petit fil de cuivre laminé en ruban. Puis il déposait électrolytiquement du cuivre sur cette ligature. Il scellait alors les fils de platine dans leur support de verre et soudait celui-ci à l'ampoule. Il faisait le vide et, quand la dépression était suffisante, il lançait le courant d'hydrocarbure gazeux et portait le filament à l'incandescence au moyen d'un courant.

Il se formait ainsi un dépôt de carbone très conducteur, dû à la décomposition de l'hydrocarbure par la haute température, sur le filament. Ce dernier devenait uniforme sur toute sa longueur, sauf vers les points d'attache avec les fils de platine. Les parties du filament dans le voisinage immédiat des ligatures se trouvant refroidies par les fils de platine n'étaient chauffées que faiblement par le courant; par suite, elles ne subissaient qu'imparfaitement le complément de carbonisation, et le dépôt de carbone y était faible ou même nul; elles constituaient donc des points faibles. En outre, on observa, en employant des pompes à mercure perfectionnées, que les dépôts galvanoplastiques emprisonnaient des gaz qu'il était impossible d'expulser complètement, car, les ligatures renfermant du cuivre et étant épaisses, on ne pouvait pas les chauffer jusqu'à l'incandescence sans surchauffer et, par suite, détériorer le filament.

Tant qu'on ne fabriqua que des lampes de faible économie, consommant 80 à 100 watts pour 16 bougies, c'est-à-dire ayant un gros filament porté à une température modérée, ce défaut n'eut pas des conséquences bien graves. Mais, quand on voulut construire des lampes économiques, consommant 4 watts et même 3,5 watts par bougie, soit 64 ou 56 watts pour 16 bougies, on constata que les filaments se brisaient

vers les points d'attache après une centaine d'heures de fonctionnement.

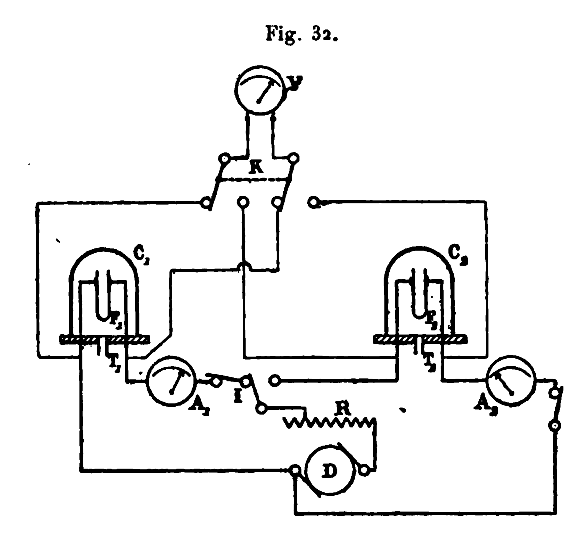
D'autre part, le mode de fixation que nous venons de décrire est d'une exécution délicate et donne lieu fréquemment à la rupture du filament pendant le travail de ligature.

On a alors abandonné ce procédé de fixation et l'on a employé le suivant : on renforce le filament brut à ses extrémités en portant celles-ci seules à l'incandescence dans un courant d'hydrocarbure gazeux raréfié. On aplatit l'une des extrémités des fils de platine et on la cintre en forme de tube dans lequel on introduit le bout renforcé du filament; puis on recouvre la jonction d'un dépôt de carbone. Cette connexion est bonne, mais coûteuse.

On a reconnu qu'il était préférable de traiter le filament à l'hydrocarbure avant de le fixer sur les fils de platine.

Les principaux hydrocarbures utilisés pour le traitement des filaments sont le gaz d'éclairage purifié, la benzine, la gazoline. On les emploie sous une faible pression.

Fig. 32.



Les filaments bruts sont poreux et hygroscopiques. Pour qu'ils n'éclatent pas pendant le traitement quand on les porte à l'incandescence, il faut qu'ils soient secs, ainsi que le gaz

hydrocarburé. On dessèche l'hydrocarbure en le faisant passer sur du chlorure de calcium.

La figure 32 est le schéma d'une double table de traitement. Les deux cloches de verre C_1, C_2 dans lesquelles s'opère le traitement ont leur bord dressé et reposent sur un plateau métallique par l'intermédiaire d'un joint de caoutchouc graissé. Le plateau porte une tubulure T_1, ou T_2, munie d'un robinet à trois voies permettant de faire communiquer la cloche soit avec un réservoir dans lequel une pompe fait un vide d'au moins 10^{mm} de mercure, soit avec la conduite amenant l'hydrocarbure gazeux qui traverse au préalable un vase contenant du chlorure de calcium.

Le circuit électrique de chaque cloche est muni d'un ampèremètre A_1, ou A_2, et un commutateur K permet de connecter un voltmètre aux bornes de l'un quelconque des deux appareils. Lorsque le traitement de l'un des filaments est terminé, on lance le courant sur la seconde cloche au moyen d'un commutateur I. On règle le courant à l'aide du rhéostat R.

Le voltmètre V indique que l'opération est terminée lorsque la tension aux bornes du filament, pour un courant donné, a baissé d'une quantité déterminée, correspondant à une diminution fixée d'avance de la résistance du filament.

On obtient un réglage plus exact du dépôt de carbone en substituant aux interrupteurs à main des appareils automatiques commandés par le nombre de watts fournis au filament. Un galvanomètre permet de mesurer la résistance à froid du filament après le traitement.

La formation du dépôt de carbone n'exige que quelques secondes. Le traitement augmente le diamètre du filament carbonisé brut d'environ $\frac{1}{100}$ de millimètre.

Les filaments sont alors classés suivant la tension et le nombre de bougies, puis ils passent à l'atelier où s'opère leur fixation sur les fils d'amenée du courant.

Le filament traité à l'hydrocarbure ayant une longueur un peu plus grande que celle qu'il aura une fois monté a été rendu uniforme sur toute sa longueur utile, y compris les parties qui seront engagées dans les attaches. On le coupe de longueur à l'aide d'un gabarit, puis on le fixe sur les fils de

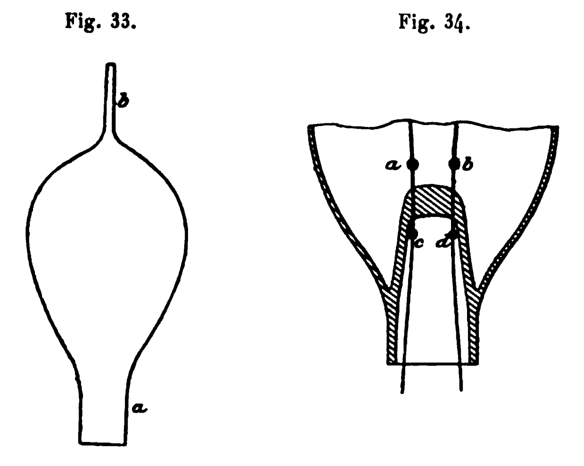
platine au moyen d'une gouttelette de pâte composée ordinairement de poudre de charbon agglomérée par exemple avec du sirop de sucre. On place alors les filaments munis de leurs fils de platine sur une tôle que l'on chauffe dans un four à gaz pendant plusieurs heures de façon à dessécher complètement les attaches. Si celles-ci sont bien faites, elles ne deviennent pas incandescentes lorsque la lampe fonctionne.

Les diverses manipulations auxquelles est soumis le filament sont délicates; elles sont exécutées par des ouvrières.

On forme l'ampoule en soufflant un tube de verre chauffé par un chalumeau à gaz sur une machine analogue à un petit tour. L'ampoule ainsi obtenue est bien ronde. Le verre doit être mince et parfaitement lisse, afin que l'échauffement de la lampe ne soit pas exagéré. L'ampoule doit être d'autant plus grande que l'intensité lumineuse de la lampe est plus forte, parce que le filament a des dimensions plus importantes et aussi pour éviter un échauffement excessif.

La figure 33 représente l'ampoule brute de la lampe Edison

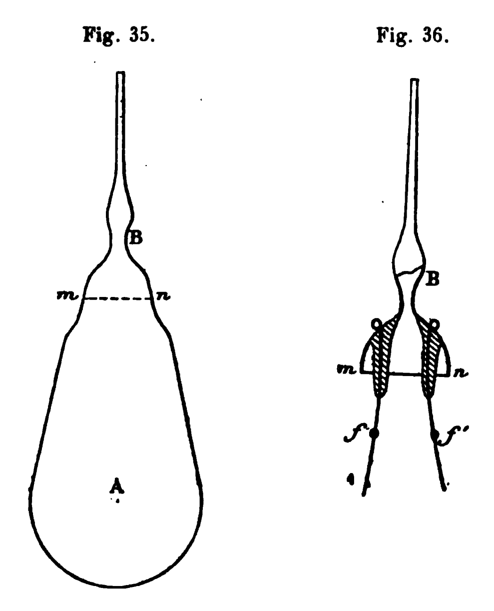
Fig. 33. Fig. 34.



et de la plupart des lampes à incandescence. On coupe de longueur le gros tube *a*, on y introduit un tube de cristal dans l'extrémité duquel on a scellé les fils de platine portant le filament (*fig.* 34) et on le soude à l'ampoule au moyen du chalumeau. Le petit tube supérieur, rapporté, sert à faire le

vide dans la lampe, après quoi on le coupe en l'étirant au chalumeau, scellant ainsi la lampe par la même opération.

La figure 35 représente une sorte d'ampoule bien moins employée que la précédente. Elle porte un seul tube B destiné à l'extraction des gaz. On coupe au diamant la base de l'ampoule suivant le trait *mn*. Dans la calotte ainsi détachée on soude deux petites tiges de cristal dans lesquelles on a préalablement noyé les deux fils de platine *f*, *f'* portant le



filament (*fig.* 36). On rapporte alors la calotte sur la partie A et l'on soude les deux pièces en les chauffant au chalumeau suivant le trait *mn*. On scelle la lampe en donnant un coup de chalumeau en B.

On a trouvé jusqu'à présent que le seul métal qui convienne pour la traversée de l'ampoule par les fils d'amenée du courant est le platine, et que la pénétration doit avoir lieu à travers une partie de cristal spécial qui adhère bien au platine et dont le coefficient de dilatation est le même que celui de ce métal.

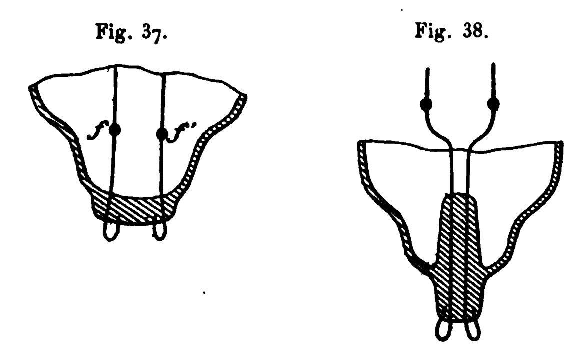
Si l'on employait un autre métal, ayant un coefficient de

dilatation différent de celui de la matière dans laquelle il se trouve scellé, les échauffements et refroidissements successifs décolleraient peu à peu le fil métallique de la masse dans laquelle il est encastré, et l'assemblage ne serait plus étanche. Il se produirait des rentrées d'air qui rendraient le vide de plus en plus défectueux, et la lampe serait rapidement mise hors service.

Pour que le platine ait le coefficient de dilatation convenable, il faut qu'il soit sensiblement pur, c'est-à-dire qu'il ne renferme que 1 à 2 pour 100 au plus de métaux étrangers.

Les figures 34, 36, 37 et 38 représentent divers modes adoptés à l'origine pour l'amenée du courant au filament.

Fig. 37. Fig. 38.



Dans la lampe Edison (*fig.* 34), les fils de platine, immédiatement après leur sortie de l'ampoule, sont soudés à des fils de cuivre qui aboutissent aux deux pièces de contact du culot.

Dans les anciennes lampes les fils de platine, de $0^{mm},4$ et $0^{mm},5$ de diamètre, avaient fréquemment une longueur supérieure à 15^{mm}, pesant ainsi par paire plus de $0^{g},08$ à $0^{g},13$. Le prix du gramme de platine, qui était en 1900 de $1^{fr},50$, est actuellement d'environ $3^{fr},50$, de telle sorte que chaque paire de fils de platine, avec les dimensions primitives, coûterait plus de $0^{fr},28$ à $0^{fr},45$, ce qui serait exorbitant par rapport au prix actuel d'une lampe.

On a donc cherché à réduire le poids de platine au strict minimum. Chaque fil de ce métal, dont la longueur est réduite à 4^{mm} ou 5^{mm}, est soudé à l'un de ses bouts à un fil

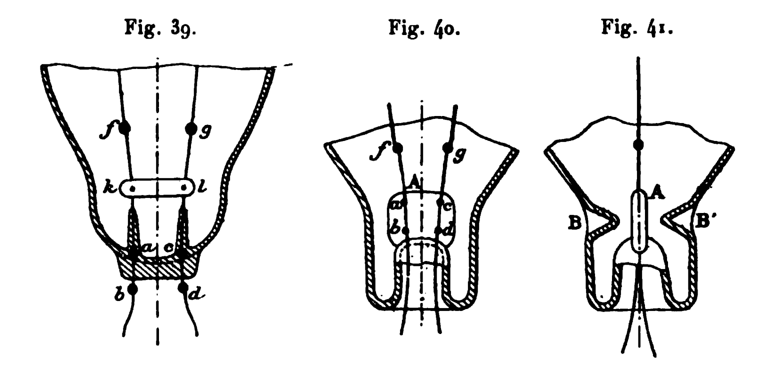
de cuivre qui sera fixé ultérieurement à l'un des contacts du culot et à l'autre bout à un fil de nickel. L'extrémité libre de ce dernier est aplatie, puis cintrée de façon à former une douille dans laquelle on engage le filament et que l'on recouvre d'une gouttelette de ciment de charbon. Le fil de platine est noyé dans une partie de cristal et assure une fermeture hermétique.

On soude les fils de métaux différents entre eux au moyen d'un chalumeau à gaz; le cuivre fond et forme un petit bourrelet autour du platine.

Les lampes de 125 à 220 volts ayant un filament de très faible diamètre et de grande longueur et, par suite, fragile, on le divise en plusieurs éléments que l'on monte en série dans la même ampoule, ou bien on le soutient en un ou plusieurs points au moyen de fils métalliques scellés dans la paroi de l'ampoule ou dans le tube portant les fils d'amenée. Ces supports auxiliaires sont terminés en crochet agrafant le filament, ou bien sont soudés à celui-ci au moyen d'une gouttelette de ciment de charbon.

Les figures 39, 40 et 41 représentent la base de deux lampes

Fig. 39. Fig. 40. Fig. 41.



modernes. *ab* et *cd* sont les parties de platine des fils d'amenée.

Dans la figure 39, *kl* est un bâtonnet de verre qui entretoise les fils métalliques, dont la partie inférieure est enrobée de cristal. On introduit dans l'ampoule le filament muni de ses fils métalliques, on ramollit au chalumeau la base de l'ampoule, puis on la ferme en la pressant au moyen d'une pince

en forme de moule, en soudant ainsi le verre aux deux petites tiges de cristal dans une sorte de nervure. Deux cavités coniques analogues à celles de la figure 41 servent à sceller au plâtre l'ampoule dans le culot.

Dans les lampes de la *Compagnie générale des lampes à incandescence* (*fig.* 40 et 41), les fils métalliques sont portés par un tube de cristal. Ces fils étant introduits dans le tube, on ramollit au chalumeau l'extrémité supérieure de celui-ci, puis on la presse en forme de nervure, de façon à emprisonner la totalité des fils de platine, ainsi qu'une partie des fils qui leur sont soudés. Les fils de platine *ab*, *cd* assurent ainsi une fermeture hermétique, tandis que les fils supérieurs *af*, *cg*, de plus grand diamètre, encastrés dans le tube, forment un support robuste pour le filament. Le tube de cristal, dont l'extrémité inférieure a été préalablement rabattue en forme de collet, est alors soudé à la base de l'ampoule. Deux cavités coniques B, B′, refoulées dans le verre, sont destinées à recevoir une partie du plâtre pour le scellement du culot sur l'ampoule.

Au début de l'industrie des lampes à incandescence on garnissait complètement de plâtre de Paris l'intervalle existant entre l'ampoule et le culot de laiton. Les fils de cuivre se trouvaient ainsi noyés dans le plâtre. Lorsque les lampes étaient exposées à l'humidité, un faible courant dérivé s'établissait entre ces conducteurs, déterminant un transport de cuivre signalé par la teinte bleue que prenait le plâtre et qui finissait parfois par couper l'un des fils. Actuellement, on laisse les fils de cuivre dans l'air sur toute leur longueur.

L'ampoule étant ainsi munie de son filament doit être privée de l'air qu'elle renferme. Nous avons vu que le vide est nécessaire, non seulement pour empêcher la combustion du filament incandescent par l'oxygène, mais encore pour annuler pratiquement la perte de puissance que produirait le transport de la chaleur du filament à l'ampoule par conduction à travers les gaz. Cette fuite de chaleur serait très importante en raison de la température énorme du filament, voisine de 1800° C.

On a souvent proposé, dans les débuts de la lampe à incandescence, de remplir l'ampoule avec un gaz inerte, tel que

l'azote, afin de soustraire le filament à la combustion. M. Zacharias cite l'expérience suivante : on a introduit dans l'ampoule vide de plusieurs lampes à incandescence de 16 bougies à la tension normale de 100 volts une quantité extrêmement faible d'azote, de façon à réduire très légèrement le vide. Dans ces conditions, pour que les lampes donnassent leur intensité lumineuse de 16 bougies, il fallait fournir à leurs bornes une tension de 200 volts, double de la valeur normale. L'échauffement de l'ampoule était tel qu'on ne pouvait plus la tenir dans la main.

Suivant M. Bainville, la consommation d'un filament dans un gaz à la pression atmosphérique est environ 10 fois plus considérable que dans le vide élevé des lampes à incandescence.

Il est donc nécessaire de pousser très loin l'extraction des gaz de l'ampoule, de façon que la pression tombe à environ $\frac{1}{100}$ de millimètre de mercure. Il faut, en outre, que ce vide se maintienne, c'est-à-dire que les fils d'amenée du courant adhèrent parfaitement au verre et que la paroi intérieure de l'ampoule, le filament et ses attaches avec les fils métalliques ne retiennent aucune quantité appréciable de gaz, lequel se dégagerait peu à peu pendant le fonctionnement de la lampe et réduirait le vide. Pour expulser l'air adhérant à la surface du verre et les gaz occlus dans le filament et ses attaches, il faut chauffer ces diverses parties.

Les pompes mécaniques, à piston, les plus perfectionnées dont on disposait au début de l'industrie des lampes à incandescence, n'étaient capables d'abaisser la pression de l'air qu'à quelques millimètres de mercure. Elles étaient donc tout à fait insuffisantes pour produire le vide dans les lampes à incandescence et l'on a eu recours aux pompes à mercure.

Torricelli est le premier qui ait fait le vide au moyen du mercure dans son baromètre.

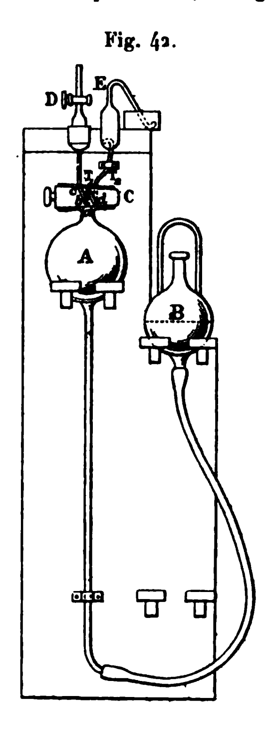
On peut diviser les pompes à mercure en deux classes :

La première comprend les appareils dans lesquels le mercure, que l'on fait alternativement monter et descendre dans un vase de verre, fait office de piston aspirant et refoulant. Le prototype est la pompe Geissler.

La seconde classe se compose des pompes à jet de mercure. Un jet de mercure tombant dans un tube de verre de petit diamètre produit le vide par entraînement des gaz. Le type de ces appareils est la pompe à mercure Sprengel.

Pompe Geissler. — La figure 42 représente une pompe Geissler munie d'un robinet spécial C, imaginé par Greiner et

Fig. 42.



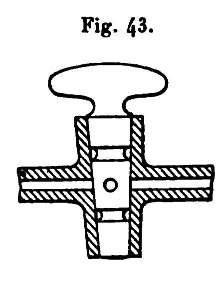
Friedrichs. Ce robinet est à trois voies. Sa clé porte deux canaux inclinés sur l'axe. Dans la position indiquée sur la figure, ce robinet fait communiquer le réservoir de verre A avec le robinet D, intercalé sur la conduite d'aspiration des lampes. En tournant la clé du robinet C de 180°, on établit la communication entre A et le petit réservoir de verre E relié à l'atmosphère par un tube de verre recourbé plongeant dans un vase de verre destiné à recueillir le mercure qui peut être refoulé.

On remplit de mercure le ballon de verre B relié à A par

un tube de caoutchouc, puis, le robinet C étant tourné de façon à isoler A des lampes et à le faire communiquer avec E, on soulève B jusqu'à ce que A soit plein et que le mercure pénètre dans E. On tourne alors C de 90°, de manière à interrompre toute communication. Puis on abaisse B et l'on tourne C encore de 90° pour faire communiquer les lampes avec A qui aspire une partie de l'air de celles-ci. On répète l'opération jusqu'à ce qu'on ait obtenu le vide désiré.

Pour rendre un robinet parfaitement étanche, Eiloart munit la clé de deux cannelures circulaires qu'il remplit de mercure (*fig.* 43). A cet effet, la clé étant enlevée, on bouche

Fig. 43.

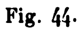


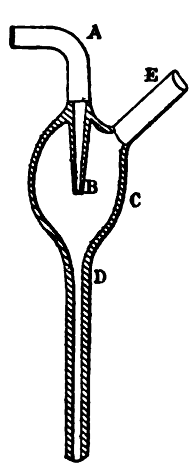
avec un doigt le boisseau à sa partie inférieure et l'on y verse du mercure; puis on introduit la clé; le mercure refoulé vient garnir les deux cannelures. Un autre avantage de ce dispositif est que, si le robinet venait à perdre, le mercure des cannelures pénétrerait dans la pompe sous forme de gouttelettes qui signaleraient le défaut d'étanchéité.

Pour relier les tubes métalliques qu'on ne peut pas souder, ou bien un tube de métal avec un autre de verre, on se sert d'un tuyau de caoutchouc. Les joints de verre sur verre se font avec un ciment composé de parties égales de résine et de cire. On chauffe au préalable les pièces à assembler, de façon à bien faire adhérer le ciment au verre. On emploie aussi la cire à cacheter, le caoutchouc non vulcanisé, ou encore un mélange de trois parties de paraffine et d'une partie de cire.

Pompe Sprengel ou trompe. — Une buse B (*fig.* 44) injecte

un filet de mercure dans un tube D. La cavité C porte une troisième tubulure par laquelle est aspiré l'air des lampes. Un récipient contenant de l'acide sulfurique concentré ou du chlorure de calcium, intercalé dans la conduite d'aspiration, dessèche l'air avant son entrée dans la pompe. Le tube de chute D aboutit à un réservoir inférieur qui recueille le mercure injecté par B et mélangé à l'air provenant de E.


Fig. 44.



Dans les petites pompes, ce réservoir porte un tube à sa partie inférieure et A descend verticalement jusqu'au-dessous de ce réservoir. Un récipient mobile, analogue à la bouteille B de la figure 42, muni d'un tube de caoutchouc, peut être mis en communication, au moyen d'un robinet à trois voies ou de deux pinces de Mohr, soit avec le tube A, soit avec le tuyau de vidange du réservoir collecteur de D. En abaissant le récipient mobile au-dessous de ce réservoir et en interrompant la communication avec A, on fait passer le mercure dans la bouteille mobile. On élève alors celle-ci au-dessus de la cavité C et on la met en communication avec le tube A. On produit ainsi l'injection du mercure en B. Le fonctionnement de la pompe est donc intermittent.

Dans les trompes plus puissantes, une pompe mécanique, centrifuge par exemple, aspire continuellement le mercure du réservoir collecteur de D et l'élève dans un récipient situé

à une hauteur d'au moins $2^m,50$ au-dessus de A et dont il s'écoule par le tube A. De la sorte, le fonctionnement de la trompe est rendu continu. Une pompe centrifuge peut desservir toute une batterie de trompes.

Deux baromètres à mercure, disposés à côté l'un de l'autre, et dont l'un, formant manomètre, est relié par sa partie supérieure au tube d'aspiration E, indiquent approximativement à chaque instant, par la différence de leurs niveaux, le vide dans les lampes au début de l'opération. Le tube E est relié aussi à un indicateur de vide Mc Leod que nous décrirons plus loin.

M. J. Zacharias indique, comme dimensions les meilleures, pour le tube de chute, $1^{mm},8$ de diamètre intérieur et 1^m de longueur. Gimingham a adopté une pompe à cinq tubes de chute soudés à la même ampoule.

Dans la dernière période d'évacuation, alors que le vide est très élevé, le jet de mercure n'est plus continu, mais formé de gouttelettes qui entraînent l'air.

L'avantage que possède la pompe Sprengel de se prêter à la commande mécanique l'a fait adopter, en général, de préférence à la pompe Geissler.

Les diverses pompes à mercure soit du type Geissler, soit du type Sprengel, bien construites, produisent un vide très élevé qui peut être bien inférieur à $\frac{1}{100}$ de millimètre de mercure.

On réduit la durée du travail des pompes à mercure en extrayant au préalable la majeure partie de l'air. A cet effet, on relie le tuyau sur lequel sont montées dix ou vingt lampes par exemple à un réservoir de 1^{m^3} dans lequel on maintient une pression d'environ 10^{mm} de mercure au moyen d'une pompe à piston du type de celles en usage dans les sucreries et les fabriques de glace, ou encore à l'aide d'une trompe à eau. On abaisse ainsi, par la simple ouverture d'un robinet, brusquement la pression dans les lampes à 10^{mm} de mercure et la durée de l'évacuation se trouve réduite d'une demi-heure environ.

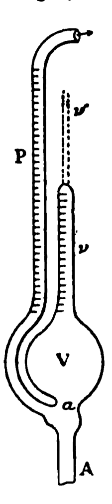
Il est important que le mercure soit pur et débarrassé de l'oxyde qui prend naissance à sa surface par l'agitation à laquelle il est soumis pendant le transport. On le passe tout

d'abord à travers un papier filtre, puis on l'agite avec de l'acide sulfurique dilué et additionné de quelques gouttes d'acide azotique. Si le mercure est très impur, on emploie l'acide azotique dilué seul. On lave ensuite le mercure à grande eau, on le sèche et on le filtre de nouveau à travers un papier ou une peau de chamois. On peut aussi purifier le mercure par distillation.

Manomètre Mc Leod. — Le manomètre ordinaire ne permet pas de mesurer les pressions excessivement faibles. On a proposé de déterminer approximativement le degré de vide au moyen de deux pointes métalliques entre lesquelles on fait jaillir une étincelle à l'aide d'une bobine de Ruhmkorff.

L'instrument le plus pratique est le manomètre Mc Leod à l'aide duquel on peut mesurer avec exactitude des pressions de gaz extrêmement petites. Le principe de la méthode consiste à isoler un volume déterminé, suffisamment grand, de gaz raréfié, puis à amener cette masse gazeuse sous un volume

Fig. 45.



réduit, que l'on mesure, assez petit pour que sa pression puisse être indiquée avec un degré d'exactitude suffisant par le tube manométrique de l'instrument.

Le manomètre Mc Leod (*fig.* 45) se compose essentielle-

ment d'un ballon de verre relié au moyen d'un tuyau A à la canalisation d'aspiration et surmonté d'un tube gradué. Un autre tube de verre soudé à la base du ballon forme manomètre.

L'appareil étant rempli par l'air raréfié dont on veut déterminer la pression, on fait monter le mercure jusqu'en a de façon à isoler le ballon de verre du tube manométrique. La masse de gaz emprisonnée a alors un volume V centimètres cubes sous la pression p millimètres de mercure. On continue alors à faire affluer le mercure de façon à refouler l'air dans une fraction du tube supérieur assez petite pour que la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes puisse être lue avec une exactitude suffisante. Les graduations donnent le nouveau volume v centimètres cubes du gaz et sa pression P millimètres de mercure. L'échauffement étant insensible, on a

$$pV = Pv$$

ou

$$p = P\frac{v}{V} \text{ millimètres de mercure.}$$

Si l'instrument doit permettre de mesurer des vides excessivement élevés, on munit le tube volumétrique d'un prolongement de plus petit diamètre, indiqué en pointillé sur la figure 45, dans lequel la masse de gaz peut être amenée à un volume extrêmement petit.

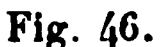
Pour expulser les gaz condensés dans le filament, il est nécessaire de le chauffer. On le porte au rouge naissant au moyen d'un courant réglé par un rhéostat qui permet de monter graduellement jusqu'à l'incandescence au fur et à mesure que le vide croît.

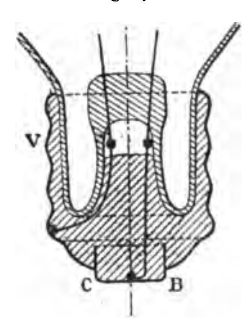
Pour accélérer l'évacuation et augmenter le vide en facilitant le départ de l'air qui adhère fortement aux parois du verre, on chauffe les lampes pendant le fonctionnement de la pompe. On se contente quelquefois de donner de temps en temps un coup de chalumeau à chaque ampoule. Mais d'ordinaire on place plusieurs lampes sous un capuchon de mica ou d'amiante sous lequel on fait brûler des becs de gaz.

Les principaux types de culots qui ont été conservés dans

les lampes à incandescence modernes sont le culot à vis Edison et le culot Swan pour douille à baïonnette.

Dans la lampe Edison, la base de l'ampoule est scellée au plâtre dans un manchon de laiton V (*fig.* 46) en forme de vis


Fig. 46.



à filet arrondi. Le même scellement porte dans l'axe une capsule de laiton C. Les deux conducteurs de cuivre formant le prolongement des fils de platine sont fixés par une goutte de soudure respectivement à V et à C. La douille, ou support de lampe, porte un manchon de laiton repoussé en forme d'écrou dans lequel vient se visser V, et qui est connecté à l'un des fils de la canalisation. Dans l'axe se trouve une pièce de laiton formant ressort, reliée au second conducteur, qui vient en contact avec la borne centrale du culot. Une enveloppe métallique isolée, séparée de l'écrou par une bague isolante, ou encore toute en porcelaine ou autre matière non conductrice, empêche tout contact de la main avec les parties métalliques portant le courant.

Dans quelques lampes, la capsule de laiton C est fixée sur une pièce de porcelaine scellée dans le manchon V.

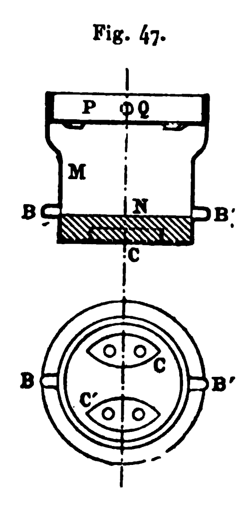
Le culot de la lampe Swan se compose d'un cylindre de laiton, muni de deux broches diamétralement opposées qui viennent s'engager dans les coulisses de la douille à baïonnette et de deux pièces de cuivre scellées excentriquement au moyen d'un ciment ou d'une sorte de verre et soudées aux conducteurs de cuivre prolongeant les fils de platine. La douille porte deux pistons de laiton coulissant dans deux cylindres connectés à la canalisation. Ces pistons sont poussés

par un ressort à boudin contre les pièces de contact du culot.

Le culot porte quelquefois une partie de plus fort diamètre qui vient se sceller sur l'ampoule présentant les deux cavités coniques indiquées sur la figure 41, page 90.

Dans quelques lampes de la *Compagnie générale des Lampes à incandescence,* on scelle au plâtre tout d'abord une bague de laiton P (*fig.* 47) en forme de cornière dont l'aile

Fig. 47.



horizontale est refoulée en quatre points de façon qu'elle ne puisse pas tourner dans son scellement. Le culot proprement dit vient s'emboîter sur cette bague. Le manchon M porte à sa partie supérieure deux trous Q diamétralement opposés, dans lesquels on introduit une goutte de soudure. Les deux broches B, B' sont obtenues en refoulant le métal et, par suite, sont creuses. Les deux contacts C, C', en laiton étampé, sont scellés dans le culot au moyen d'une sorte de verre (vitrite). Les deux trous de ces pièces de contact servent tout d'abord à les repérer dans le moule, puis l'un d'eux reçoit le fil de cuivre que l'on soude à l'étain.

On fait aussi des culots de forme analogue, mais composés de vitrite dans laquelle sont encastrés les contacts C, C' et les broches B, B'.

2° *Fabrication moderne des lampes à filament de carbone.*

Les perfectionnements apportés à la fabrication des lampes à filament de carbone ont eu pour but l'abaissement du prix de revient et la réduction de la consommation spécifique.

La diminution du prix de revient, en dehors de l'influence favorable exercée par une production beaucoup plus considérable, a été obtenue principalement par la substitution aussi complète que possible du travail mécanique au travail manuel, par la réduction des fils de platine au strict nécessaire et par une méthode rapide de production du vide.

L'augmentation du rendement lumineux a été réalisée à l'aide d'un filament parfaitement uniforme, à surface polie et, par suite, doué de propriétés sélectives; d'attaches avec les fils d'amenée très soignées et complètement débarrassées de gaz occlus. On a ainsi pu *pousser* ce filament plus robuste, c'est-à-dire le faire fonctionner à une température plus élevée, tout en assurant à la lampe une vie utile suffisante.

La majeure partie du travail de soufflage du verre est effectuée actuellement à la machine, au moule. On obtient ainsi des ampoules très uniformes, ayant toutes les mêmes dimensions. Certaines opérations n'ont pu être rendues mécaniques : telles sont le soudage des divers éléments des fils d'amenée du courant, la fixation du filament sur les fils métalliques et le soudage des fils conducteurs sur les contacts du culot.

On fabrique le filament de la manière suivante : on dissout de la cellulose pure, coton ou papier filtre, à chaud dans une solution concentrée de chlorure de zinc. On obtient ainsi une substance de consistance sirupeuse que l'on chasse par compression au travers d'une filière de platine immergée dans de l'alcool de bois. Le jet de cellulose liquide au contact de l'alcool se solidifie en prenant la forme d'un fil blanc. Le vase renfermant la filière et l'alcool tourne autour de son axe vertical, de telle sorte que le fil s'enroule en peloton.

On lave le fil pour éliminer le chlorure de zinc, puis on le sèche sur une calandre. On le coupe en morceaux que l'on met sur forme et que l'on carbonise au blanc pendant 12 à 36 heures dans un creuset brasqué et luté hermétiquement. On a alors un filament noir, ayant la forme de boucle donnée

par le moule, qui possède parfois un très grand poli, mais qui le plus souvent est d'un brillant sombre et est généralement fragile. La carbonisation réduit le diamètre du fil de moitié environ. La longueur elle-même diminue beaucoup.

On classe les filaments par catégories de diamètres différents, la tolérance pour ceux d'un même lot étant d'environ $\frac{1}{300}$ de millimètre. On en fait des faisceaux et on les coupe de longueur, puis on les soumet au traitement spécial que nous avons déjà décrit.

Cette opération consiste à porter le filament, au moyen d'un courant électrique, à un haut degré d'incandescence dans une vapeur raréfiée d'hydrocarbure, ordinairement la gazoline. Le carbone provenant de la décomposition de l'hydrocarbure se dépose sur le filament sous un état ressemblant au graphite.

Ainsi que nous l'avons déjà expliqué, ce traitement produit trois effets :

1° Il complète la carbonisation, à une température plus élevée que celle du creuset. On peut déceler des traces de cellulose incomplètement décomposée dans la plupart des filaments avant le traitement, mais rarement après cette opération. Si l'on employait directement le filament brut dans la lampe, la carbonisation se compléterait pendant le fonctionnement en dégageant des gaz qui réduiraient la vie de la lampe. Du reste, le traitement chasse une partie des gaz occlus dans le filament et l'hydrogène fourni par la décomposition de l'hydrocarbure facilite l'élimination de l'oxygène.

2° Les filaments gradués soigneusement, ayant même diamètre et même longueur, diffèrent souvent très notablement entre eux comme résistance. La carbonisation complémentaire diminue la résistivité du charbon. En outre, le dépôt superficiel de carbone très conducteur permet de réduire la résistance des filaments à une même valeur fixée d'avance. Les parties du filament plus résistantes soit par suite de leur diamètre plus faible, soit à cause d'une plus grande résistivité du charbon en ces points, sont portées à une température plus élevée et se manifestent par un plus grand éclat, de telle sorte que le dépôt de carbone se produisant plus rapidement sur ces éléments devient plus épais et rend la résistance du filament constante sur toute sa longueur. En résumé,

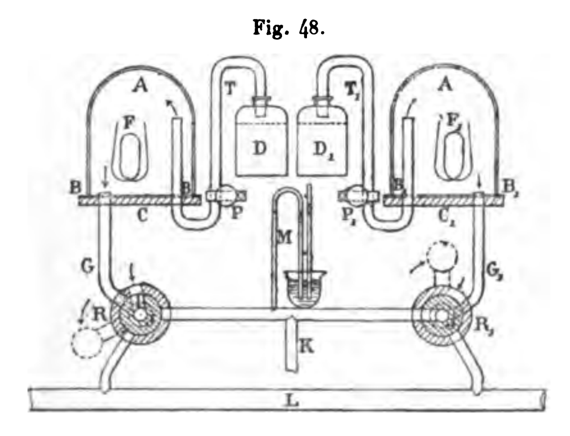
on donne au filament une résistance uniforme et de valeur déterminée, exigée par la tension imposée, par l'intensité lumineuse et le rendement désirés.

3° Le dépôt de carbone donne au filament une surface polie, ayant l'apparence de l'acier, qui augmente son pouvoir sélectif.

Le diamètre et la longueur du filament brut sont choisis de telle sorte que la résistance à froid du filament traité soit un peu inférieure à la moitié de celle du filament brut. Ainsi, le filament d'une lampe de 16 bougies 110 volts, consommant 3,1 watts par bougie, soit 49,6 watts ou 0,45 ampère à 110 volts, doit avoir après traitement, à froid, 510 ohms, et provenir d'un filament brut ayant 1100 ou 1 200 ohms.

Si l'on ne possède pas en magasin des filaments bruts appropriés, on peut, au besoin, en prendre d'autres dont on réglera la résistance à la valeur voulue par l'épaisseur du dépôt de carbone dans l'hydrocarbure. Mais l'expérience montre que les filaments finis, dont la résistance n'est que de 45 pour 100 inférieure à celle des filaments bruts, sont médiocres. D'autre part, si la résistance doit être réduite de 65 pour 100 par le traitement, l'opération est coûteuse sans fournir un filament meilleur que dans les conditions normales.

Fig. 48.



Une table de traitement est disposée pour deux filaments, de façon que le travail soit continu (*fig.* 48). On fixe les

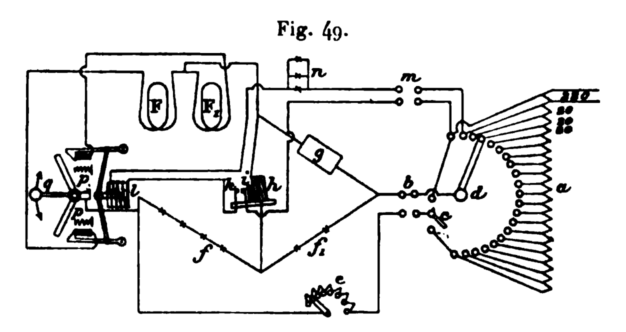
extrémités du filament brut F dans des pinces métalliques portées par des supports amenant le courant. Une cloche de verre A, dont le bord est dressé, repose, par l'intermédiaire d'un joint de caoutchouc B enduit d'huile épaisse ou de suif, sur un plateau métallique C. Un tuyau T, de verre ou de métal, en forme de S, pénètre d'une part jusqu'à la partie supérieure de la cloche de verre, et d'autre part dans la région supérieure d'une bouteille contenant de la gazoline. Sur le tuyau T est intercalé un tube de caoutchouc muni d'une pince à vis P. Un second tuyau G part du bas de la cloche A et aboutit à un robinet à trois voies R permettant de faire communiquer A soit avec l'atmosphère, soit avec un tuyau L, venant d'une pompe à vide ordinaire, soit enfin avec un tube K relié à une pompe à mercure.

La pompe à piston permet de maintenir dans la cloche une pression de $1^{mm},6$ de mercure. Ce vide étant établi, on desserre la pince P et l'on règle l'arrivée de la gazoline, de façon à avoir dans la cloche une pression de 12^{mm} à 20^{mm} de mercure que mesure un manomètre M, juxtaposé à un baromètre.

Grâce à la position relative de l'extrémité des tuyaux T et G, la gazoline circule autour du filament, puis se rend à la pompe. On lance alors le courant dans le filament.

Un dispositif spécial coupe automatiquement le courant lorsque la résistance du filament atteint la valeur fixée d'avance. A cet effet, le filament soumis au traitement forme

Fig. 49.



l'une des quatre branches d'un pont de Wheatstone (*fig.* 49), et est monté en série avec un rhéostat *g* de 111 ohms, réglable par cran de 0,1 ohm. Les deux autres branches,

formant le second circuit, sont constituées par des lampes à incandescence f et f_1.

Le galvanomètre se compose d'un petit électro-aimant *h*, dont l'enroulement a une résistance de 80 ohms, et dont le noyau est formé d'un faisceau de fils de fer. Cet électro-aimant attire une armature de fer doux inclinée *i*, que la pesanteur tend à écarter de *h*. Lorsque la résistance du filament atteint la valeur prédéterminée, le courant traversant l'électro-aimant devient très petit, l'armature *i* tombe et ferme le contact à charbons *k* d'un relais, lequel actionne un interrupteur automatique qui coupe le circuit du filament.

On enclenche alors la seconde palette de l'interrupteur automatique, de façon à lancer le courant dans le filament F_1 que l'on soumet ainsi au traitement pendant que l'on remplace le premier par un filament brut. La résistance initiale de F_1 étant élevée, l'électro *h* attire l'armature *i* et le courant se trouve coupé dans le solénoïde *l*.

Le courant est fourni par un transformateur à enroulement unique *a*, connecté à un commutateur à 21 plots (*fig.* 49). La tension entre les deux premières touches est 220 volts et celle entre deux plots consécutifs suivants quelconques, 20 volts, de telle sorte que l'on peut obtenir des tensions successives différant de 20 volts et comprises entre 220 volts et $220 + 380 = 600$ volts.

Un commutateur *c* permet de connecter l'un des fils de départ soit au premier plot, soit au dernier. Avec cette seconde combinaison on peut obtenir des tensions variant de 20 en 20 volts entre 0 et 380 volts, puis sautant brusquement à 600 volts.

e est un rhéostat pour l'ajustement exact de la tension aux bornes du pont. Le rhéostat de lampes *n* permet de régler la force du solénoïde *l*.

Les pompes à mercure ont été employées pendant une vingtaine d'années pour l'extraction de l'air des lampes avant l'adoption du procédé chimique actuel.

Les pompes Sprengel sont de construction très simple et bon marché; leur réparation est aisée. En outre, l'élévation du mercure s'opère mécaniquement. Leur fonctionnement est donc économique. Chaque lampe à vider peut avoir sa

pompe spéciale. Si la pompe fuit, une seule lampe se trouve endommagée. Par contre, les trompes ont l'inconvénient de produire des vapeurs mercurielles qui déterminent des commencements d'empoisonnement. Les ouvriers ont les mains enduites d'un onguent mercuriel formé par le mélange du mercure avec les huiles épaisses ou les graisses employées pour rendre étanches les robinets et les joints. Le recrutement des ouvriers est, par suite, difficile.

La pompe Geissler étant quelque peu compliquée et sa manipulation exigeant la présence d'un ouvrier, on a été conduit à réduire le nombre de ces appareils au minimum, et l'on a monté une vingtaine de lampes sur un même réservoir desservi par une pompe.

Les pompes Geissler présentent plusieurs inconvénients :

1° Elles sont fragiles. Si l'une des lampes en vidange vient à se briser, il en résulte une brusque rentrée d'air qui peut amener la rupture de la pompe.

2° Si l'une des ampoules fuit, toutes les lampes commandées par la même pompe se trouvent soustraites à l'action de celle-ci. Si la fuite est faible, toutes les lampes du groupe risquent d'être endommagées.

Pour expulser les gaz et les vapeurs emprisonnés par le filament et ses attaches ou adhérant aux parois de l'ampoule, il est nécessaire de porter ces différentes parties à une température assez élevée. On a essayé de chauffer l'ampoule en la recouvrant d'un capuchon d'amiante, la chaleur étant fournie par un courant électrique traversant le filament. Mais l'opération est délicate, car, si le capuchon est trop épais, l'ampoule est surchauffée, se ramollit et s'affaisse.

Lorsqu'on se sert de la pompe Geissler pour faire le vide, on dispose une vingtaine de lampes sous un même capuchon que l'on chauffe à volonté à la température convenable, au moyen de flammes de gaz. De cette façon, les lampes d'un groupe sont toutes portées sensiblement à la même température et l'on ne dépend pas des filaments pour produire la température initiale. On peut pousser loin l'extraction des gaz et des vapeurs avant de porter les filaments à l'incandescence par le courant. On risque donc beaucoup moins de brûler les filaments que dans la méthode précédente. Si les

filaments ne possèdent pas tous exactement la même résistance, la température de toutes les lampes placées sous le même capuchon tend à s'égaliser.

Dans l'opération que nous venons de décrire, l'ampoule et le filament se trouvent chauffés convenablement et, par suite, sont parfaitement privés des gaz emprisonnés. Mais il n'en est pas de même des attaches du filament avec les fils métalliques, car, leur section étant considérable, il faudrait, pour les porter à une température élevée, les faire traverser par un courant intense qui endommagerait le filament. On est parvenu à chauffer fortement ces attaches en faisant passer une partie du courant, directement d'une attache à l'autre, à travers le gaz de l'ampoule. Pour que cette dérivation s'établisse, il est nécessaire que la raréfaction soit élevée, mais non exagérée. Si l'on applique la tension à la lampe avant que le vide ne soit poussé assez loin, on brûle la surface du filament qui perd ainsi son poli et peut prendre l'aspect du noir de fumée. Si l'on attend trop longtemps, le vide devient un peu trop grand et, pour faire passer le courant d'attache à attache, il faut amener la tension, à l'aide du commutateur de réglage, à une valeur nuisible pour le filament. Enfin, si la raréfaction est très grande, on ne peut plus faire passer le courant d'une jonction à l'autre, et il devient donc impossible de chauffer celles-ci.

Avec les pompes à mercure, dont l'action est lente, la tension nécessaire dans cette opération est d'au moins 10 pour 100 supérieure à la tension normale et doit être appliquée, au minimum, pendant 20 minutes.

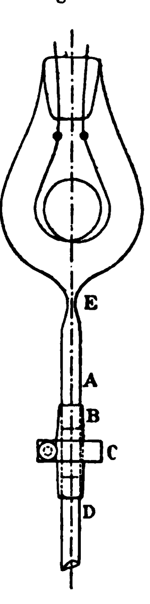
Le procédé chimique actuel est beaucoup plus rapide et économique que la méthode de la pompe à mercure.

Une pompe à piston, qui aspire et refoule en même temps que l'air une petite quantité d'huile non volatile, dont le rôle est d'annuler les espaces morts, produit un vide de $\frac{1}{8}$ de millimètre de mercure, correspondant à une pression d'environ $\frac{1}{6000}$ de kilogramme par centimètre carré.

On introduit, à l'aide d'un pinceau, un peu de solution de phosphore amorphe dans le tube A (*fig.* 50), puis on connecte celui-ci à la canalisation d'aspiration de la pompe, au moyen d'un tuyau de caoutchouc B muni d'une pince à vis C

et formant ainsi robinet. Environ 30 secondes après que la lampe a été reliée à la pompe, on lance le courant dans le filament sous une tension supérieure d'environ 10 pour 100 à la tension normale. Le courant passe alors en partie d'une

Fig. 50.



jonction du filament à l'autre à travers l'espace gazeux, chauffant ces attaches à blanc, température que l'on maintient pendant quelques secondes. On réduit alors le courant à l'aide du rhéostat, en laissant la lampe reliée à la pompe encore pendant environ 5 secondes pour enlever les gaz dégagés par ce chauffage.

On isole alors la lampe de la pompe au moyen de la pince C et l'on augmente la tension aux bornes jusqu'à ce que le courant passe d'une jonction à l'autre, de façon à porter de nouveau celles-ci au blanc. Au bout d'une seconde, la tension demeurant invariable, la flamme bleue allant d'une attache à l'autre s'élargit progressivement en passant du bleu sombre à un beau bleu clair, tandis que les attaches se refroidissent quelque peu. A ce moment, on donne un coup de chalumeau au tube A pour volatiliser le phosphore. Celui-

ci s'allie aux gaz restant dans l'ampoule et forme un précipité solide si les conditions sont bonnes. Il faut éviter de volatiliser trop de phosphore qui colorerait l'ampoule.

Les pompes mécaniques ordinaires ne produisent pas une raréfaction suffisante pour laisser passer le courant d'une attache à l'autre. La pompe à huile donne un vide beaucoup plus grand, mais pas assez élevé pour empêcher ce passage de courant.

La durée totale d'évacuation de la lampe est d'une minute et demie environ, tandis que le filament est soumis à l'action du courant pendant une minute seulement. Le filament n'est donc surchauffé que pendant un temps très court, sous une tension qui n'est pas supérieure à celle exigée par le procédé de la pompe à mercure, dans lequel les lampes ne brûlent pas moins de 20 minutes à une tension supérieure d'au moins 10 pour 100 à la normale, et c'est seulement vers la fin de l'opération que le vide se rapproche de la valeur qu'il doit avoir dans la lampe terminée. Ces quelques minutes de fonctionnement à une tension supérieure à la normale, à une incandescence élevée et dans un vide imparfait, réduisent considérablement la vie de la lampe. Même lorsqu'un vide élevé a été obtenu, ces lampes, dont le filament a perdu son aspect métallique, ne donnent leur intensité lumineuse normale que pour une tension supérieure à celle pour laquelle elles sont établies. L'expérience montre que leur intensité lumineuse croît rapidement au début, puis décroît presque aussi vite après 50 ou 100 heures de fonctionnement.

Dans le procédé chimique, le travail n'offre aucun danger et n'est pas pénible. Il est exécuté par des femmes.

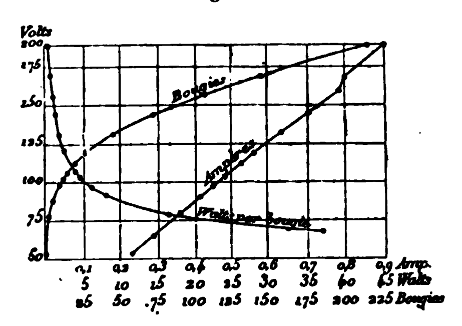
III. — Variation de l'intensité lumineuse avec la tension.

Nous avons donné (Chap. I, p. 49 et suiv.) quelques Tableaux et quelques formules indiquant la variation de l'intensité lumineuse de lampes à filament de carbone en fonction de la puissance absorbée, du courant et de la tension. L'intensité lumineuse croît beaucoup plus rapidement que la tension aux bornes.

Les diagrammes de la figure 51, que nous empruntons à M. Bainville (*Soc. Int. des Electr.*, 1905, mai 3), représentent

l'intensité lumineuse, le courant et la consommation spécifique d'une lampe de 16 bougies 110 volts en fonction de la tension.

Fig. 51.



Dans des cas particuliers où il est difficile d'obtenir une tension constante aux bornes de la source d'énergie, par exemple dans certains systèmes d'éclairage électrique des trains, on a limité l'amplitude des variations du courant avec la tension en montant en série avec les lampes un rhéostat en fil de fer dont la résistance croît rapidement avec la température et, par suite, avec le courant, et en sens inverse de celle du filament de carbone.

Dans une installation d'essai d'éclairage de train faite par une compagnie anglaise, une dynamo disposée sur la locotive charge une batterie de 30 accumulateurs en série, dont le groupement est invariable. Chaque lampe est montée en série avec une résistance en fil de fer. La tension de charge de la batterie est réglée à la valeur maximum de

$$2,50 \times 30 = 75 \text{ volts},$$

tandis que la tension minimum à la décharge est

$$1,85 \times 30 = 55,5 \text{ volts}.$$

Les résistances ont donc à régler sensiblement entre 55 et 75 volts. A 55 volts, ces rhéostats absorbent 10 volts et, par suite, les lampes fonctionnent à 45 volts. A 75 volts, le courant devenant plus intense, la résistivité du fer augmente de telle façon que les résistances absorbent 27 volts environ et les lampes fonctionnent alors à 48 volts. Le courant dans les

lampes varie ainsi, entre ces limites, d'environ 4 pour 100 au-dessus et au-dessous de la valeur moyenne.

La variation de l'intensité lumineuse avec la tension fait prévoir que, dans le cas d'une force électromotrice alternative, la fréquence doit exercer une influence sur la fixité de la lumière.

Si la tension alternative est sinusoïdale, à très longue période, l'intensité lumineuse de la lampe variera entre un minimum, se produisant à peu près à l'instant où la tension est nulle, et un maximum correspondant sensiblement à chaque valeur maximum, positive ou négative, de la force électromotrice. La fréquence des variations de l'intensité lumineuse est donc double de celle de la tension. Comme l'intensité lumineuse varie beaucoup plus que la force électromotrice, elle sera très faible dans le voisinage des zéros de cette dernière, et elle aura une valeur supérieure à la moyenne dans le voisinage des maxima de la tension. A chaque alternance la lampe produira pour ainsi dire un éclair entre deux temps sombres. Si la fréquence de la tension est excessivement faible, les intervalles lumineux alterneront avec des extinctions complètes, le filament ne commençant à émettre des radiations lumineuses que lorsque sa température atteint 525° C.

D'autre part le filament, en vertu de sa capacité calorifique, emmagasine, en s'échauffant, dans l'intervalle de temps pendant lequel la force électromotrice varie au-dessus d'une certaine valeur, une partie de l'énergie électrique qu'il rayonnera, en se refroidissant, dans l'intervalle suivant pendant lequel la tension varie au-dessous de la valeur mentionnée, la puissance totale rayonnée par le filament étant alors supérieure à la puissance électrique qui lui est fournie.

Si, maintenant, nous donnons à la fréquence une valeur plus grande, nous diminuerons la durée des extinctions ainsi que la valeur de l'intensité lumineuse maximum, puisque pendant chaque alternance de la tension le filament aura moins de temps pour se refroidir, d'une part, et pour s'échauffer, d'autre part. Si nous augmentons encore la fréquence, nous pourrons arriver à annuler les temps d'extinction. A partir de ce moment, la fréquence continuant à

croître, la capacité calorifique du filament tendra à réduire de plus en plus l'amplitude des variations de l'intensité lumineuse. L'œil percevra de moins en moins ces oscillations au fur et à mesure que la fréquence augmentera, non seulement parce qu'elles deviendront plus faibles, mais encore parce qu'elles seront plus rapides.

Plus le diamètre du filament est petit, plus sa masse est faible par rapport à la surface rayonnante. Par conséquent, plus l'intensité lumineuse de la lampe est faible, ou bien plus la tension de fonctionnement est élevée, ou bien encore plus la lampe est économique, plus est grande la différence entre les valeurs maximum et minimum de l'intensité lumineuse, pour une fréquence donnée, et, par suite, plus ces battements de lumière sont fatigants pour la vue.

Pour les lampes de 110 volts consommant de 3 à 3,5 watts par bougie, la fréquence de 25 périodes par seconde peut être considérée comme une limite encore acceptable. Ainsi la distribution de Buffalo alimente un grand nombre de lampes de 8 à 32 candles par un réseau à 3 fils, à 2 × 125 volts et à 25 périodes par seconde. Les stations de l'*Elevated Railway* de New-York sont éclairées par environ 30000 lampes à incandescence de 110 volts, à 25 périodes par seconde. Pour réduire les battements, on a adopté des lampes à rendement médiocre, consommant 4 watts par candle.

Lorsque l'éclairage doit être produit par un courant triphasé de faible fréquence, on peut atténuer le papillotage en employant des lampes à trois filaments, ou en montant les lampes par groupe de trois sous un même globe opale ou dépoli et connectées respectivement aux trois sections du réseau. Le résultat est sensiblement le même que celui que l'on obtiendrait en triplant la fréquence. Le dernier dispositif est appliqué à l'éclairage des voitures du chemin de fer de la Valtellina actionné par un courant triphasé de 15 périodes par seconde.

Les fluctuations de l'éclat d'un filament soumis à une tension alternative peuvent être constatées aisément, même à la fréquence de 50 périodes par seconde, de la manière suivante :

Disposant d'une tension alternative de 110 volts à la fré-

quence de 50 périodes par seconde, prenons une lampe de 5 bougies à 105 volts, et employons-la à éclairer à une faible distance, 15^{cm} ou 20^{cm} par exemple, une toupie formée d'un petit axe de bois fixé dans une rondelle de liège sur laquelle est collé un disque de carton de 7^{cm} de diamètre. Ce disque porte sur sa face supérieure 6 ou 8 secteurs alternativement blancs et noirs.

Lorsqu'on fait tourner cette toupie à la lumière du jour ou en l'éclairant au moyen d'une lampe à courant continu, la surface du disque présente une teinte grise uniforme.

La toupie étant lancée à grande vitesse sous la lampe à courant alternatif, on aperçoit tout d'abord des lignes radiales gris clair, en nombre égal à celui des secteurs blancs, tournant dans le même sens que la toupie si la vitesse de celle-ci est suffisante. La toupie se ralentissant, ces secteurs clairs tournent de plus en plus lentement, paraissent immobiles pendant un temps très court, puis se mettent à tourner en sens inverse de la rotation de la toupie. Ces régions claires sont produites par l'éclairement plus intense des secteurs blancs dans le voisinage des maxima d'éclat du filament qui ont lieu 100 fois par seconde. A l'instant où ces régions sont immobiles, un secteur blanc vient prendre la place de celui qui le précède après une demi-période. Si la toupie a 8 secteurs, elle fait alors $\frac{1}{4}$ de tour en $\frac{1}{100}$ de seconde, ou $\frac{100}{4} = 25$ tours par seconde, soit 1500 tours par minute.

On sait que ces lignes mobiles fictives sont très accentuées avec une lampe à arc, alimentée par un courant alternatif.

IV. — Variation de l'intensité lumineuse avec la durée de fonctionnement. — Vie des lampes a filament de carbone.

La variation de l'intensité lumineuse avec la tension, que nous avons examinée, se rapporte aux lampes à l'état neuf.

L'expérience montre que, lorsqu'on fait fonctionner une lampe à filament de carbone à sa tension normale, constante, son intensité lumineuse croît pendant les premières heures, atteint un maximum, puis décroît indéfiniment.

Le Tableau suivant reproduit les résultats des expériences

faites par M. Uppenborn sur 25 lampes à filament de carbone, de 16 hefners, de la station électrique de Munich (*The El. W. and Eng.*, 1905, mars 18) :

DURÉE d'incandescence en heures.	INTENSITÉ lumineuse horizontale en hefners.	PUISSANCE absorbée en watts	CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.
0,25	16,3	54	3,296
48	17,6	55,3	3,16
144	17,95	55,4	3,08
200	16,66	55,18	3,33

Après un fonctionnement de 200 heures, l'intensité lumineuse n'est pas encore redescendue à sa valeur initiale.

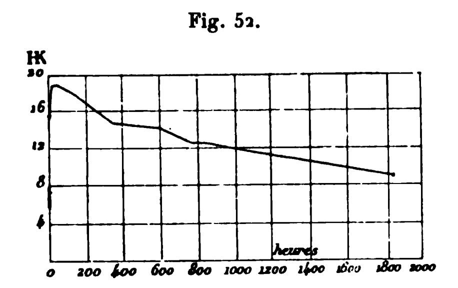
Le Tableau ci-après, ainsi que le diagramme de la figure 52, indiquent les moyennes des résultats obtenus par M. Wedding dans des essais de durée effectués en 1905 sur 4 lampes à filament de carbone, de 16 hefners à 110 volts :

DURÉE d'incandescence en heures.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ lumineuse horizontale en hefners.	CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.
0	0,460	50,68	15,7	3,23
21,5	0,471	51,81	18,6	2,81
44	0,475	52,55	18,7	2,80
110	0,474	52,11	18,1	2,88
223	0,473	52,03	16,3	3,19
344	0,466	51,5	14,9	3,44
485	0,458	50,42	14,5	3,48
609	0,458	50,08	14,1	3,57
757	0,450	49,45	12,7	3,89
850	0,442	48,97	12,7 (?)	3,83 (?)
1420	0,427	47,03	10,7	4,39
1826	0,423	46,05	8,6	5,44

L'intensité lumineuse horizontale est de 15,7 hefners à l'origine, atteint au bout de 44 heures sa valeur maximum de 18,7 hefners, supérieure d'environ 19 pour 100 à celle du

début, puis diminue et passe de nouveau par sa valeur initiale après 250 heures de fonctionnement. Après 1826 heures d'incandescence à la tension normale, l'intensité lumineuse

Fig. 52.



Variation de l'intensité lumineuse horizontale d'une lampe à filament de carbone de 16 hefners (HK) en fonction du temps d'incandescence.

tombe à 8,6 hefners, valeur inférieure d'environ 45,2 pour 100 à l'intensité lumineuse initiale. Les nombres de la troisième colonne montrent que la puissance absorbée varie dans le même sens que l'intensité lumineuse.

Le Tableau suivant reproduit les résultats obtenus par M. Wedding à la même époque avec une lampe à filament de carbone de 25 hefners horizontaux à 110 volts :

DURÉE d'incandescence en heures.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ lumineuse horizontale en hefners.	CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.
0	0,704	77,4	23,9	3,44
21,5	0,720	79,2	28,4	2,79
44	0,722	79,4	28,3	2,80
110	0,7235	79,6	27,2	2,94
223	0,7195	79,25	24,9	3,17
344	0,714	78,5	23,2	3,36
489	0,704	77,5	23,3	3,34
609	0,701	77,1	22,0	3,52
757	0,689	75,8	18,7 (?)	4,06 (?)
850	0,680	74,8	19,5	3,85
1420	0,662	72,8	16,6	4,38
1826	0,656	71,1	13,8	5,25

Après 1826 heures, l'intensité lumineuse est inférieure d'environ 42,3 pour 100 à celle du début.

Lorsque le filament se trouve à la température très élevée de l'incandescence sa surface se désagrège lentement et les particules extrêmement ténues de carbone sont projetées par les courants dérivés à travers l'espace gazeux. S'il existe encore dans l'ampoule des traces d'oxygène, elles brûlent une petite partie du filament en formant de l'oxyde de carbone. Ce gaz, au contact du filament de carbone incandescent, se dissocie; son carbone est projeté contre la surface interne de l'ampoule et l'oxygène rentre dans le cycle.

Ces phénomènes ont quatre conséquences principales qui concourent à réduire progressivement l'intensité lumineuse de la lampe :

1° La section du filament diminue et, par suite, sa résistance augmente. La puissance reçue décroît donc, et avec elle le flux lumineux;

2° La surface devient plus grossière, plus *noire,* dans le sens de la théorie du rayonnement. Elle perd plus ou moins ses propriétés sélectives. Elle rayonne donc, pour une même température, relativement plus de chaleur et moins de lumière. Cette altération tend donc à diminuer la température du filament;

3° Le rapport de la surface rayonnante à la section du filament et, par suite, à la puissance reçue, augmente, d'où résulte un abaissement de la température du filament. Cet effet vient s'ajouter aux précédents, pour réduire le rendement lumineux du filament;

4° Le dépôt de particules de carbone diminue la transparence de l'ampoule et arrête, par conséquent, une partie du flux lumineux émis par le filament.

Plus la tension à laquelle on fait fonctionner une lampe à filament de carbone donnée est grande, c'est-à-dire plus la température de son filament est élevée et, par suite, plus la lampe est économique au début, plus la diminution de l'intensité lumineuse est rapide.

M. Busquet a fait, en 1904, une expérience comparative

sur une lampe normale de 32 bougies 110 volts, consommant 3,1 watts par bougie, et sur une lampe *poussée* donnant 32,9 bougies à 110 volts avec un courant de 0,659 ampère et absorbant, par suite, au début, 72,5 watts, soit 2,20 watts par bougie.

Après 420 heures d'incandescence, l'intensité lumineuse de la lampe normale est tombée à 19,6 bougies, soit à 61,25 pour 100 de sa valeur initiale. Après la même durée d'incandescence, l'intensité lumineuse de la lampe poussée s'est trouvée réduite à 16,5 bougies, soit à 50 pour 100 de sa valeur initiale, tandis que la consommation spécifique s'est élevée à 3,96 watts par bougie, le courant étant alors de 0,594 ampère.

Le Tableau suivant indique les résultats des expériences effectuées par M. Jouaust au Laboratoire Central d'Électricité, sur deux lampes de 50 bougies et sur une lampe de 16 bougies économique (M. Bainville, *Soc. int. des électr.*, 3 mai 1905).

DURÉE d'incandescence en heures.	TENSION aux bornes en volts.	COURANT en ampères.	PUISSANCE absorbée en watts.	INTENSITÉ lumineuse en bougies.	CONSOMMATION spécifique en watts par bougie.
		1° *Lampe marquée* 50 *bougies* 100 *volts.*			
0	110	1,66	183	86,4	2,13
25	110	1,66	183	84,0	2,17
50	110	1,62	178	69,3	2,57
100	110	1,56	172	55,9	3,08
		2° *Lampe marquée* 50 *bougies* 105 *volts.*			
0	110	1,56	172	64,7	2,65
25	110	1,57	183	64,0	2,86
50	110	1,57	183	61,3	2,98
100	110	1,55	171	56,8	3
		3° *Lampe marquée* 16 *bougies.*			
0	110	0,42	46,2	17,4	2,66
25	110	0,42	46,2	17,4	2,66
50	110	0,415	45,7	16,7	2,74
100	110	0,406	44,7	15,7	2,84

Signalons, en passant, qu'il est important de nettoyer de temps à autre l'ampoule des lampes à incandescence, car les poussières et les diverses malpropretés qui se déposent sur leur surface produisent une perte d'intensité lumineuse qui peut atteindre 50 pour 100.

Les lampes à filament de carbone ont parfois une vie absolue considérable. M. Wedding (*E. T. Z.*, 1905, janvier 19 et février 23) cite le cas de 4 lampes de 16 hefners 110 volts qui, après une durée d'incandescence de plus de 14000 heures dans le laboratoire de la *Technische Hochschule* de Charlottenburg, continuaient à fonctionner en donnant environ 5 hefners. Les ampoules étaient devenues très noires.

Le Tableau ci-après indique, d'après des expériences faites en 1883, la vie absolue de lampes Edison de 10 et de 16 candles pour différentes intensités lumineuses initiales (J. Zacharias, 1890) :

LAMPES DE 10 CANDLES.		LAMPES DE 16 CANDLES.	
Intensité lumineuse initiale en candles.	Vie absolue en heures.	Intensité lumineuse initiale en candles.	Vie absolue en heures.
8	2260	10	5550
9	1470	11	3963
10	**1000**	12	2857
11	714	13	2134
12	512	14	1628
13	385	15	1292
14	294	**16**	**1000**
15	233	17	802
16	179	18	651
17	145	19	534
18	118	20	443
19	96	21	371
20	80	22	312
		23	266
		24	228
		25	196
		30	163

M. Foussat a trouvé, dans les expériences qu'il a effectuées

en 1885 à l'usine Edison d'Ivry-sur-Seine, sur une série de lampes établies pour 100 volts, les nombres du Tableau suivant comme moyennes de la vie absolue des lampes de cette époque à différentes tensions (J. Zacharias, 1890).

TENSION AUX BORNES en volts.	VIE ABSOLUE en heures.
95	3595
96	2751
97	2135
98	1645
99	1277
100	1000
101	785
102	601
103	477
104	375
105	248

M. F.-M. Wright a publié, en 1885 (J. Zacharias, 1890), la formule suivante :

$$E' - E = K \log \frac{T_E}{T_{E'}}, \tag{1}$$

dans laquelle T_E est la vie absolue en heures d'une lampe donnée, à la tension E volts, $T_{E'}$ la vie absolue de la même lampe à la tension E', et K un coefficient à déterminer pour chaque système de lampe.

Cette formule peut s'écrire

$$\log \frac{T_{E'}}{T_E} = \frac{E - E'}{K}. \tag{2}$$

En se reportant au Tableau précédent, on a, pour $E = 95$ et $E = 96$,

$$E' - 95 = K(\log 3595 - \log T_{E'}),$$
$$E' - 96 = K(\log 2751 - \log T_{E'}),$$

relations qui donnent, par différence,

$$1 = K(\log 3595 - \log 2751).$$

La valeur du coefficient K pour les lampes en question est donc

$$K = 8,60523.$$

Actuellement on considère comme seule importante la *vie utile* de la lampe, définie comme étant la durée de fonctionnement à tension constante pendant laquelle l'intensité lumineuse diminue de 20 pour 100.

M. Marshall donne le Tableau ci-dessous indiquant la vie utile ainsi définie, que l'on peut obtenir pour les lampes à filament de carbone de 16 candles à différentes consommations spécifiques comprises entre 5 et 2 watts par candle horizontale (*The Electr. World and Eng.*, 1905, juillet 29 et septembre 30).

Watts par candle....	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2
Watts absorbés	80	72	64	56	48	40	32
Vie utile en heures...	6125	3570	2005	1000	412	132	28

M. Marshall a trouvé que la vie utile T_u, en heures, d'une lampe à filament de carbone peut être représentée par la formule

$$\log T_u = \frac{5,478}{8,7\frac{B}{P}},$$

dans laquelle $\frac{B}{P}$ est le nombre de candles produites par 1 watt.

Suivant son auteur, cette formule donne des résultats concordant bien avec ceux de l'expérience pour les consommations spécifiques comprises entre 3 et 5 watts par candle.

V. — Consommation spécifique.

La tension normale des lampes à incandescence à filament de carbone est comprise d'ordinaire entre 105 et 125 volts et est, en général, de 110 volts. Cependant dans quelques installations on a adopté la tension de 220 volts pour réduire le coût des canalisations de distribution.

L'expérience montre que les lampes de 220 volts, dont le filament est très fin et très long, ont une consommation spé-

cifique plus élevée et une vie utile plus courte que les lampes de 110 volts.

Une série d'essais de consommation à tension constante, fournie par une batterie d'accumulateurs, ont été effectués au Laboratoire Central d'Électricité sur des lampes de 5, 10 et 16 bougies, de 110 et de 220 volts, provenant de cinq fabriques différentes (*L'Industrie électrique*, 1905, janvier 25). La consommation spécifique initiale a été trouvée égale, en moyenne, à 3,6 watts par bougie pour les lampes de 110 volts et à 4,4 watts par bougie pour les lampes de 220 volts. Après un fonctionnement de 200 heures, la consommation spécifique a atteint 3,87 watts par bougie pour les lampes de 110 volts et 5,19 watts par bougie pour les lampes de 220 volts.

D'autres expériences effectuées dans le même laboratoire (*The El. W. and Eng.*, 1905, sept. 3) sur des lampes de 110 et de 220 volts, provenant d'une fabrique française, ont encore montré la supériorité des lampes de 110 volts sur celles de 220 volts, de même intensité lumineuse, au double point de vue du rendement et de la vie utile. La différence de consommation spécifique a été trouvée égale, en moyenne, à 20 pour 100 en faveur des lampes de 110 volts. Le Tableau suivant reproduit les résultats moyens de ces expériences :

Tension aux bornes en volts.	Intensité lumineuse nominale des lampes.								
	5 bougies.			10 bougies.			16 bougies.		
	Intensité lumineuse horizontale en bougies.	Facteur de conversion sphérique.	Watts par bougie.	Intensité lumineuse horizontale en bougies.	Facteur de conversion sphérique.	Watts par bougie.	Intensité lumineuse horizontale en bougies.	Facteur de conversion sphérique.	Watts par bougie.
110	6,34	0,71	3,52	10,5	0,73	3,58	16,2	0,81	3,66
220	7,43	0,69	3,82	9,2	0,71	4,54	14,0	0,75	4,57

Les lampes de 220 volts se sont détériorées plus rapidement que celles de 110 volts. Après 200 heures de fonctionnement la consommation spécifique moyenne des lampes de 220 volts soumises aux essais a été supérieure de 34 pour 100 à celle des lampes de 110 volts.

VI. — Lampe a filament de carbone graphité.

M. John Howell a perfectionné le filament de carbone en le graphitant. Il a décrit son procédé dans un Mémoire lu au Congrès de *American Institute of Electrical Engineers,* à Asheville, en 1905.

Le filament ordinaire brut est porté à une très haute température dans un four électrique; il est ensuite soumis au traitement dans la vapeur d'hydrocarbure, puis de nouveau cuit au four électrique.

Le four est constitué essentiellement par un tube de charbon, de 76^{mm} de diamètre extérieur et de 32^{mm} de diamètre intérieur. Ce tube est noyé dans du charbon en poudre ou dans du carbure de titane qui le protègent contre la combustion. Ses extrémités sont garnies d'amiante et les bornes de cuivre sont refroidies par une circulation d'eau. Les filaments sont placés par faisceaux dans de petites capsules ou de petites boîtes cylindriques de charbon que l'on achève de remplir avec de la poussière de charbon, puis ces récipients sont introduits dans le tube. Les extrémités de ce four tubulaire sont connectées aux bornes secondaires d'un transformateur fournissant un courant d'environ 1900 ampères à 12 volts, soit 23 kilowatts. On chauffe 20 à 30 minutes et même pendant plusieurs heures.

Les filaments sont alors traités dans la vapeur d'hydrocarbure qui les recouvre d'une couche de carbone très conducteur, qui est probablement du graphite, puis ils sont de nouveau cuits dans le four tubulaire à la même température que dans la première opération.

On a essayé de mesurer la température de cuisson des filaments à l'aide de la méthode suivante : On laisse l'une des extrémités du tube de charbon ouverte et l'on observe la boîte renfermant les filaments en interposant sur le trajet du rayon visuel une lampe à incandescence ordinaire de 16 bougies 50 volts. On fait croître la tension aux bornes de la lampe jusqu'à ce que son filament devienne invisible devant la boîte de charbon. A ce moment, le filament de la lampe et la boîte de charbon ont le même éclat intrinsèque et, par conséquent,

sont à la même température. On a trouvé que la lampe fonctionne alors à une tension sensiblement double de la normale. Ainsi la lampe de 50 volts doit être soumise à une tension voisine de 100 volts.

La température a été calculée d'après la loi de Lummer qui s'énonce ainsi : Aux températures élevées, l'éclat intrinsèque d'un filament est proportionnel à la douzième puissance de sa température absolue.

Le Tableau ci-après indique, suivant M. Howell, l'intensité lumineuse d'une lampe de 16 candles à diverses tensions exprimées en pour 100 de la tension normale.

Tension en pour 100 de la tension normale.	Intensité lumineuse en candles.
100	16
153	125
161	163
183	230
200	280

En admettant que le filament de la lampe à incandescence ait la même température que l'intérieur du four, on trouve que les températures employées dans celui-ci sont comprises entre 2300° C. et 3000° C. Ces nombres concordent avec les mesures au pyromètre.

M. Howell estime qu'on ne peut pas obtenir d'effet utile au-dessous de 2000° C. Les résultats les meilleurs sont donnés par une température bien supérieure, à laquelle le quartz, le platine et les oxydes rares se volatilisent et disparaissent. A ces températures extrêmes, le tube de charbon ne dure que quelques heures.

La cuisson du filament, après son traitement dans l'hydrocarbure, modifie principalement la couche de carbone précipité de l'hydrocarbure. On peut sans difficulté séparer de l'âme du filament d'une lampe de 16 bougies ce dépôt sur une longueur de 25^{mm} et même supérieure et l'on obtient ainsi un tube à paroi très mince. On pense que la substance de cette gaine, qui possède un lustre métallique, est une variété nouvelle de graphite. Frottée sur du papier, elle y laisse

la trace brillante de la plombagine. Elle donne certaines réactions chimiques du graphite : un mélange de chlorate de potassium et d'acide azotique fumant la transforme en acide graphitique insoluble. Un échantillon avait une densité de 1,96.

La cuisson au four électrique réduit la résistance à froid du filament dans une proportion qui peut atteindre 80 pour 100 de la résistance primitive. Ainsi un filament avait une résistance de 1000 ohms avant la cuisson et de 200 ohms après cette opération.

Le filament cuit possède, au moins dans le voisinage de la température de fonctionnement normal de la lampe, un coefficient de température positif.

La haute température à laquelle s'opère la cuisson volatilise les matières étrangères. Il est nécessaire de cuire le filament avant et après le traitement dans l'hydrocarbure, car, si l'on se contentait de le cuire après traitement, les gaz et les vapeurs dégagés de l'âme du filament traversant la couche extérieure à l'état pâteux la boursoufleraient. On doit élever progressivement la température pendant la première cuisson, afin d'éviter les craquelures que produirait un dégagement trop brusque de gaz.

Les lampes à filament de carbone graphité, ou *métallisé*, sont fabriquées par la *General Electric Company*. La consommation spécifique indiquée est de 2,5 watts par candle.

CHAPITRE IV.

LAMPE A FILAMENT D'OSMIUM.

Nous avons vu dans le Chapitre précédent que la température du filament de carbone des lampes à incandescence en fonctionnement normal est voisine de 1800° C. Quelques inventeurs ont cherché à accroître le rendement lumineux en substituant au carbone un métal extrêmement réfractaire, capable de supporter une température plus élevée et, en outre, possédant, grâce au poli de sa surface, des propriétés sélectives de longueur d'onde plus marquées. Le platine fondant à 1775° C. ne convient pas à la confection de filaments.

M. Auer von Welsbach a adopté l'osmium qu'il est parvenu à obtenir sous forme de fil approprié à la fabrication de lampes à incandescence.

L'osmium se trouve le plus souvent dans le minerai de platine sous forme d'alliage osmium-iridium, et aussi dans les sables aurifères, en compagnie de l'or et de l'argent.

Lorsqu'on dissout le platine dans l'eau régale, on obtient un résidu formé principalement d'un alliage d'osmium et d'iridium. Ce résidu, qui n'est soluble dans aucun acide, est alors fondu avec l'un des trois métaux suivants : zinc, plomb et étain, qui s'allie à l'osmium et à l'iridium. Si le métal auxiliaire est le zinc, on le chasse par volatilisation à haute température. Si c'est l'étain, on le dissout par l'acide chlorhydrique. On obtient ainsi l'alliage osmium-iridium ou osmiure d'iridium, sous forme de poudre fine. En chauffant celle-ci dans un courant d'oxygène on la transforme en tétroxyde d'osmium et en iridium. Le tétroxyde d'osmium ou acide osmique, volatil, corrosif, vénéneux, doué d'une odeur forte, est chauffé avec un réducteur, tel que l'hydrogène et donne l'osmium métallique en poudre. On fond celle-ci à une température

extrêmement élevée et l'on retire du creuset un régule de métal bleuâtre.

L'osmium est le plus dense et l'un des plus réfractaires des métaux connus. Sa densité est 22,5. Il fond à 2500° C. environ. C'est un métal rare, d'un prix très élevé.

M. Auer constata que ce métal est trop cassant pour qu'on puisse l'étirer en fil. Il recouvrit alors d'osmium un fil de platine extrêmement fin, puis il volatilisa la majeure partie du platine. Mais il se formait, à la très haute température exigée par cette opération, un alliage d'osmium et de platine qui, pour une teneur supérieure à 4 pour 100 de platine, commençait à fondre pendant la volatilisation du métal auxiliaire. Ces fils devaient donc avoir une section au moins égale à 20 fois celle de l'âme de platine. Comme les fils de platine de diamètre inférieur à $0^{mm},02$ ne peuvent pas être obtenus avec une section uniforme, les fils d'osmium fabriqués au moyen de ce procédé devaient donc avoir un diamètre d'au moins $\frac{1}{10}$ de millimètre. Des fils aussi gros ne convenant qu'à des lampes de plus de 1 ampère, M. Auer chercha une autre méthode permettant d'obtenir des fils fins pour lampes à faible courant.

M. Auer imagina alors le procédé suivant : il fit passer des fils de coton de faible diamètre dans une bouillie composée d'osmium en poudre fine et d'un agglutinant sirupeux. Ces fils, bien imprégnés, étaient alors séchés, puis carbonisés.

Actuellement, M. Auer fait une pâte épaisse d'osmium très finement divisé et de cellulose dissoute formant agglutinant. Cette pâte, épaisse mais plastique, est filée sous pression au travers d'une filière de diamant ou de saphir. On reçoit le fil, à sa sortie de la filière, sur un carton que l'on déplace de façon à former des V. On sèche le fil et on le carbonise à l'abri de l'air pour décomposer la matière organique. On obtient ainsi le filament d'osmium brut, poreux, renfermant une forte proportion de carbone.

On procède alors à la *formation* du filament, laquelle consiste à chauffer, au moyen d'un courant électrique, le filament brut dans une atmosphère chargée de vapeur d'eau et contenant aussi une certaine quantité d'un gaz réducteur, l'hydrogène.

On fait croître le courant graduellement de façon à élever la température jusqu'au blanc. La vapeur d'eau transforme le carbone en oxyde de carbone et en acide carbonique, tandis que l'hydrogène empêche l'oxydation de l'osmium. Après un temps relativement très court on obtient un filament à peu près complètement débarrassé de carbone.

Le filament *formé* a une densité beaucoup plus grande qu'à l'état brut, mais il est poreux : examiné au microscope, il présente une série de cavités.

La fixation du filament sur les fils d'amenée du courant a été réalisée dans le début au moyen d'un ciment composé principalement d'osmium finement divisé. Mais, pendant l'évacuation par la pompe à vide, ces perles de ciment ne pouvaient pas être chauffées jusqu'au blanc et conservaient avec opiniâtreté des gaz occlus. On se contenta alors de serrer les extrémités du filament dans des douilles fixées aux fils de platine. Malheureusement le contact ainsi obtenu est imparfait et il arrivait fréquemment que le filament se brisât pendant l'opération du serrage des douilles.

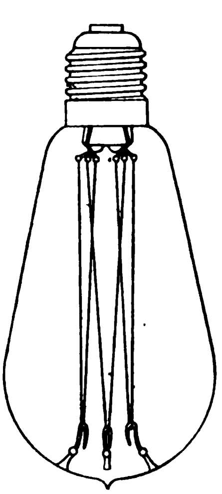
Actuellement on soude le filament d'osmium sur les fils de platine au moyen de l'arc électrique. On obtient de la sorte un contact parfait par soudure autogène et une connexion absolument sûre.

Le filament d'osmium est cassant à froid. A la température de l'incandescence il se ramollit quelque peu; il doit donc être tenu dans la position verticale. On ne peut pas l'enrouler en hélice comme le filament de carbone, car à l'état incandescent il s'affaisserait. Les lampes doivent fonctionner dans la position verticale.

Pour les lampes dont la tension n'est pas exceptionnellement basse, on monte dans la même ampoule plusieurs filaments en forme de V (*fig.* 53) que l'on relie en série. Chacun de ces V est maintenu à sa pointe par un crochet. Dans les débuts on employait des crochets de fil de platine; mais on constata que les filaments se coupaient toujours au contact de ces supports. On a alors adopté des crochets formés d'un fil d'oxyde de thorium blanc, fixé à l'extrémité d'une petite tige de verre soudée à l'ampoule.

Comme pour la lampe à filament de carbone, un vide très élevé est nécessaire non seulement pour soustraire le filament à l'oxydation, mais encore pour supprimer sensiblement la perte de chaleur par conduction à travers les gaz.

Fig. 53.



Les lampes à l'osmium ont une forme analogue à celle des lampes à filament de carbone. La figure 53 représente une lampe à trois filaments en série, munie d'un culot à vis. Ces lampes donnent une lumière plus blanche que celles au carbone.

A l'origine les lampes à l'osmium ont été établies pour une tension maximum de 27 volts. Puis on a pu atteindre 37 volts. Elles pouvaient alors être montées par groupes de trois sur 110 volts.

Le filament d'osmium d'une lampe de 25 hefners à 37 volts a un diamètre de $0^{mm},087$ et une longueur de 280^{mm} environ. La résistance à 20° C. d'un fil de cette substance de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur est de 0,095 ohm, correspondant à une résistivité de 9,5 microhms-centimètre. A la température de l'incandescence normale pour une consommation spécifique de 1,5 watt par hefner, la résistivité est 8,4 fois plus élevée, c'est-à-dire que la résistance d'un fil de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur est de 0,80 ohm. Le

filament considéré ayant une section de $0^{mm^2},00594$, sa résistance à chaud est

$$\frac{0,80}{0,00594}\,0,280 = 37,6 \text{ ohms.}$$

La lampe absorbe donc un courant égal à

$$\frac{37}{37,6} = 0,984 \text{ ampère.}$$

La surface du filament étant

$$3,14.0,087 \times 280 = 76,5^{mm^2},$$

la surface rayonnante par unité d'intensité lumineuse est

$$\frac{76,5}{25} = 3^{mm^2},06 \text{ par hefner horizontal.}$$

M. Auer est parvenu à établir les lampes de 25 hefners pour la tension de 44 volts.

Le prix indiqué (en 1906) pour la lampe de 25 hefners est de 4 marks, soit 5^{fr}, en gros, et de 6 marks, ou $7^{fr},50$, au détail.

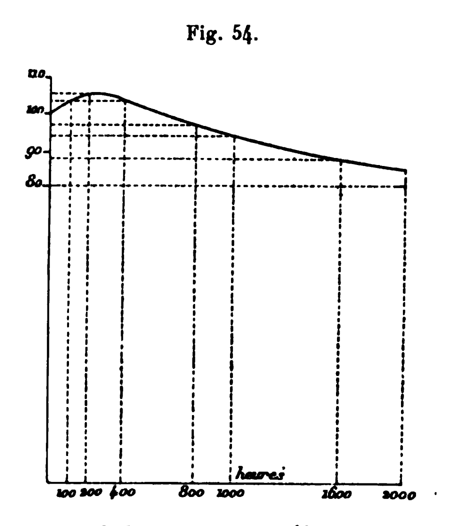
Grâce à la valeur positive du coefficient de température de l'osmium, l'intensité lumineuse varie beaucoup moins rapidement avec la tension que pour le filament de carbone. Ainsi, suivant M. Fritz Blau, un accroissement de 10 pour 100 de la tension détermine dans le filament d'osmium une augmentation de courant de 6,5 pour 100 et un accroissement d'intensité lumineuse de 40 pour 100, tandis que pour la lampe à filament de carbone le même accroissement de tension augmenterait le courant de 12 pour 100 et l'intensité lumineuse de 80 pour 100. Cependant la Société Auer recommande de ne pas dépasser la tension indiquée.

Nous avons donné, pages 52 et 53, trois Tableaux d'essais de lampes à filament d'osmium.

Le diagramme de la figure 54, que nous empruntons à M. F. Blau, représente la variation de l'intensité lumineuse de lampes à filament d'osmium de 25 et de 32 hefners, de 37 et de 44 volts, en fonction de la durée d'incandescence. L'intensité lumineuse, en pour cent de l'intensité lumineuse

normale, est portée en ordonnées. L'intensité lumineuse croît pendant les premières heures, puis décroît indéfiniment. On soumet la lampe à la tension normale pendant plusieurs heures avant sa mise en vente afin de rendre son fonctionnement plus constant. Mais alors elle n'est pas encore complètement formée; le travail se continue pendant les premières heures de service. Au début la surface du filament est

Fig. 54.



Variation de lumière de lampes pour 37 à 44 volts et 25 à 32 hefners en pour cent de la puissance lumineuse initiale.

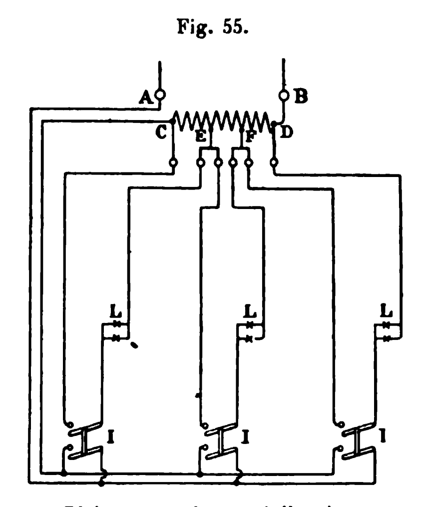
supérieure à celle donnée par le calcul d'après le diamètre et la longueur. Sous l'action de la haute température les particules d'osmium se soudent plus intimement les unes aux autres, les rugosités s'aplanissent, la surface totale réelle diminue et le filament devient de plus en plus compact. La puissance absorbée ne diminuant pas, l'intensité lumineuse augmente.

La Compagnie anglaise concessionnaire de la vente des lampes à filament d'osmium garantit une vie utile de 500 heures seulement à la consommation spécifique de 1,5 watt par hefner horizontal, pour une réduction finale d'intensité lumineuse de 20 pour 100.

Grâce à sa faible résistivité et à son rendement élevé l'osmium convient à la confection de lampes portatives avec accumulateur. Ainsi on a établi une lampe de sûreté de mine de 2 volts alimentée par un élément d'accumulateur.

Le principal défaut des lampes à filament d'osmium pour les applications ordinaires, en dehors de leur prix élevé, est la faible tension à laquelle elles doivent fonctionner par suite de leur résistance très réduite. Comme dans la plupart des cas il n'est pas possible de les monter par groupes de plusieurs en série, on peut les rendre indépendantes sur les réseaux ordinaires *à courant alternatif*, à 110 volts, par exemple, en les alimentant chacune par un petit transformateur à enroulement unique à trois bornes, dont le rendement est bon même pour une si petite puissance. Les deux extrémités de l'enroulement sont connectées à la canalisation à 110 volts, tandis que l'une des bornes extrêmes ainsi que la

Fig. 55.



Diviseur pour lampes à l'osmium.

borne intermédiaire sont reliées à la lampe. On obtient ainsi aisément la tension appropriée à chaque lampe. On monte l'interrupteur sur l'un des fils amenant le courant à 110 volts afin de supprimer la perte dans le noyau de fer lorsque la lampe est éteinte.

On peut employer, dans les installations à courant alternatif, le dispositif Ehrentraut avec répartiteur unique (*fig.* 55). A, B sont les bornes de la canalisation de distribution aux lampes connectées au réseau à 110 volts, par exemple. C et D sont les extrémités de l'enroulement du répartiteur, ou diviseur, muni de bornes intermédiaires E, F, ..., en nombre tel que les tensions entre C et E, E et F, etc. aient la valeur désirée. Chaque interrupteur double I permet simultanément de fermer l'un des circuits de lampes L et de connecter la borne d'arrivée A à l'extrémité C de la bobine. Lorsque toutes les lampes sont éteintes, l'enroulement du diviseur se trouve hors circuit et, par conséquent, la perte à vide dans le noyau est supprimée.

CHAPITRE V.

LAMPE A FILAMENT DE TANTALE.

Partant du principe que la partie visible des radiations du filament des lampes à incandescence croît rapidement avec la température, les ingénieurs de la Société Siemens et Halske ont cherché depuis plusieurs années à découvrir une substance se prêtant à la confection de filaments et capable de supporter une température plus élevée que celle qu'admet le fonctionnement économique des lampes à incandescence ordinaires. Leurs recherches furent dirigées vers les métaux à point de fusion très élevé. M. von Bolton, à qui furent confiées ces recherches, étudia en particulier trois métaux : le vanadium, le niobium et le tantale.

M. v. Bolton obtint le vanadium en réduisant le pentoxyde de vanadium VO^5 par voie électrolytique. Mais, son point de fusion ayant été trouvé égal à 1680°C., ce métal fut éliminé.

L'étude du niobium montra que son point de fusion est bien supérieur à celui du vanadium et égal à 1950°C. Cette température est encore insuffisante pour le but visé. En outre, le filament porté à l'incandescence par le passage du courant projette des particules. Ce métal a donc été abandonné.

Après une étude approfondie, M. v. Bolton fixa son choix sur le tantale, beaucoup plus réfractaire que les deux métaux précédents. Il a employé pour sa préparation les deux méthodes suivantes :

1° Il agglomère le tétroxyde de tantale sous forme d'un fil qu'il électrolyse dans le vide en le faisant traverser par un courant électrique. Au début de l'opération l'air emprisonné dans les pores du fil est expulsé. On continue à faire le vide

et l'on augmente la température du fil de façon à le porter progressivement jusqu'au blanc. Il présente alors quelques points très brillants dont l'étendue croît peu à peu jusqu'à ce que le fil possède un éclat intrinsèque uniforme sur toute sa longueur. Pendant cette opération il se dégage un gaz que l'on a reconnu être de l'oxygène pur. La teinte brune initiale de l'oxyde se change en la couleur grise du métal, et le fil de tantale métallique devient, après plusieurs heures d'incandescence, flexible comme un fil de cuivre;

2° Il prépare tout d'abord le tantale impur par la méthode de Berzélius et Rose en chauffant le fluotantalate de potassium avec du potassium ou du sodium. Il se forme du fluorure de potassium, ou de sodium, qu'on élimine par lixiviation à l'eau. La masse métallique ainsi obtenue contient une certaine quantité d'oxygène et d'hydrogène, ce dernier gaz ayant été absorbé pendant la réduction du fluotantalate. Il purifie alors le métal en le fondant dans le vide au moyen de l'arc électrique. L'hydrogène est expulsé par la haute température et l'oxygène se sépare par dissociation.

A froid, le tantale offre une grande résistance aux agents chimiques. Il n'est pas attaqué par l'acide chlorhydrique bouillant, l'eau régale, l'acide azotique, l'acide sulfurique, les solutions alcalines. Seul l'acide fluorhydrique l'attaque à la température ordinaire.

Chauffé dans l'air, il prend vers 400°C. une teinte jaune. Des fils fins de ce métal brûlent lorsqu'on les allume dans l'air, sans vivacité et sans flamme appréciable.

Le tantale absorbe avec avidité, même au rouge naissant, l'hydrogène et l'azote, en formant des combinaisons d'apparence métallique, mais un peu friables.

Il se combine au carbone en donnant naissance à des carbures ayant l'aspect métallique, mais durs et cassants.

La poudre de tantale contenant encore de l'oxyde et de l'hydrogène a une densité de 14. A l'état de pureté et étiré en fil, le métal a une densité de 16,8.

Le tantale pur a une couleur un peu plus sombre que le platine. Sa dureté est voisine de celle de l'acier. Il est malléable, mais le martelage produit peu d'effet, de sorte que l'étirage en feuille est lent. Il se lamine et il s'étire en fils

très fins. Sous forme de fil il a une charge de rupture d'environ 93kg par centimètre carré.

Son coefficient de dilatation linéaire entre 0°C. et 60°C. est 0,0000079. Il fond entre 2250° C. et 2300° C. Sa fusion est précédée d'un ramollissement progressif qui commence à une température inférieure de plusieurs centaines de degrés au point de fusion. Sa chaleur spécifique est 0,0363 et son poids atomique, 183. Sa chaleur atomique est donc

$$0,0363 \times 183 = 6,64,$$

en concordance avec la loi de Dulong et Petit.

La résistivité du tantale à la température ordinaire est de 16,5 microhms-centimètre. Un fil de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur a donc une résistance de 0,165 ohm. A la température à laquelle est porté le filament dans la lampe consommant 1,5 watt par hefner, la résistivité est 85 microhms-centimètre correspondant à une résistance de 0,85 ohm pour un fil de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur. La résistance du filament à la température normale de fonctionnement est donc environ cinq fois celle à froid, tandis que la résistance du filament de carbone se trouve réduite de moitié dans ces conditions. Le coefficient de température du tantale est égal à + 0,003 entre 0°C. et 100°C. et à + 0,0026 entre 0°C. et 350°C.

Les principaux minerais de tantale sont les *colombites* et les *tantalites,* que l'on peut considérer, dans leur partie essentielle, comme des tantalates de fer et de manganèse en proportions variables, les tantalites contenant plus d'acide tantalique que les colombites. Ces minéraux se rencontrent dans diverses régions de l'Amérique, de l'Australie, de l'Allemagne, de la Suède et de la Norvège, et en particulier au Groenland, dans le Connecticut et à Bodenmais, en Bavière.

Les études relatives à la construction de la lampe même ont été confiées à M. Feuerlein.

C'est le 28 janvier 1903 que fut construite la première lampe qui supporta un long essai de durée. Le filament, en forme de fer à cheval, était constitué par un fil de tantale obtenu à la filière, de $0^{mm},28$ de diamètre et de 54^{mm} de lon-

gueur. La résistance du filament à froid était de 0,29 ohm, correspondant à 0,331 ohm pour la résistance d'un fil de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur. Le métal n'était pas pur.

Les mesures photométriques ont été faites aux trois régimes de 2 watts, 1,5 watt et 1 watt par hefner. Les valeurs correspondantes de la tension, du courant et de l'intensité lumineuse sont inscrites dans le Tableau ci-dessous :

Consommation spécifique, en watts par hefner...	2	1,5	1
Tension aux bornes, en volts..................	4,40	4,95	5,90
Courant, en ampères..........................	5	5,46	6,20
Intensité lumineuse, en hefners................	11	18	37

Au régime de 1 watt par hefner, la lampe dura 20 heures et l'ampoule noircit fortement.

Le calcul, basé sur les données des premières lampes, indiquait qu'une lampe de 32 hefners pour 110 volts, à 1,5 watt par hefner, devrait avoir un filament de $0^{mm},06$ de diamètre et de 520^{mm} de longueur. Mais le métal des premières lampes renfermait des impuretés, probablement du niobium et du carbone, qui augmentaient sa résistivité et étaient la cause de la forte pulvérisation noircissant l'ampoule. Avec le métal pur, dont on disposa bientôt, ayant une résistivité moitié moindre, la résistance d'un fil de 1^{mm^2} de section et de 1^m de longueur, étant 0,165 ohm, le filament d'une lampe de 32 hefners 110 volts, à 1,5 watt par hefner, doit avoir $0^{mm},055$ de diamètre et 700^{mm} de longueur. Pour la lampe de 25 hefners, le diamètre doit être de $0^{mm},05$ et la longueur de 650^{mm}.

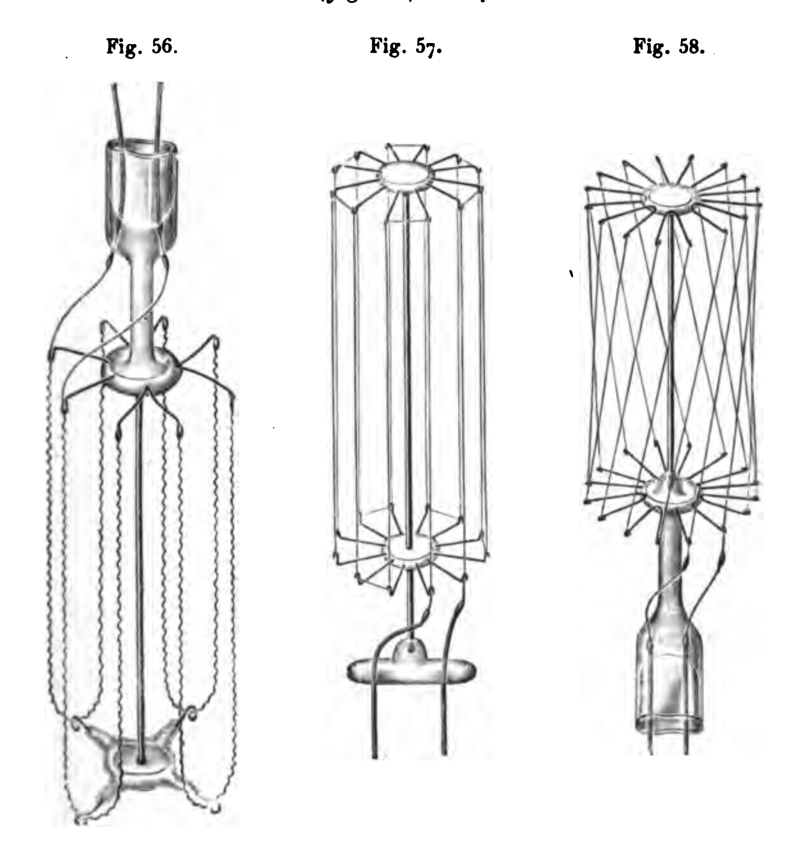
Après de nombreuses expériences on réussit à obtenir un fil de tantale suffisamment long, de $0^{mm},05$ à $0^{mm},06$ de diamètre, et en juillet 1903 fut établie une lampe ayant un filament de tantale d'environ $0^{mm},05$ de diamètre et de 54^{mm} de longueur, en forme de fer à cheval. Elle absorbait 0,58 ampère à la tension de 9 volts, et produisait une intensité lumineuse de 3,5 hefners pour une consommation spécifique de 1,5 watt par hefner.

Dans les lampes à incandescence ordinaires, même à la

tension élevée de 220 volts, le filament de carbone a seulement 350^{mm} à 400^{mm} de longueur. Dans une lampe au tantale de 25 hefners, le filament, qui a 650^{mm} de longueur, doit être fixé, d'une manière pratique et solide, dans une ampoule de dimensions égales ou peu supérieures à celles d'une lampe à incandescence ordinaire.

Le filament ondulé (*fig.* 56) n'a pas donné des résultats

Fig. 56. Fig. 57. Fig. 58.

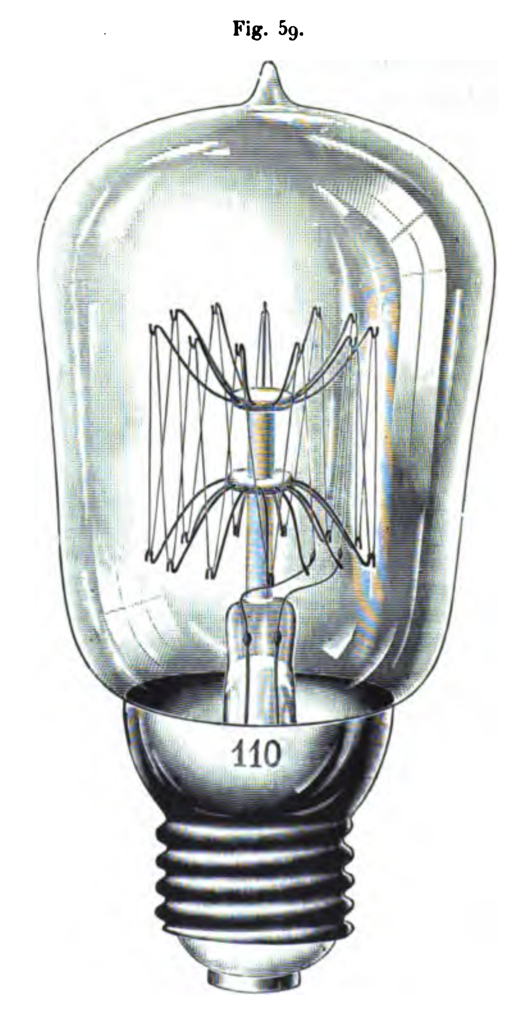


satisfaisants : le ramollissement du fil de tantale est déjà très important au régime de 1,5 watt par hefner.

On a alors divisé le filament en éléments rectilignes de faible longueur, soutenus à leurs extrémités par des supports isolés. La figure 57 représente la partie intérieure de la première lampe de ce genre, construite en septembre 1903,

pour une tension voisine de 110 volts. Un axe de métal porte à ses extrémités deux lentilles de verre dans chacune desquelles se trouvent encastrées 12 tiges métalliques terminées

Fig. 59.

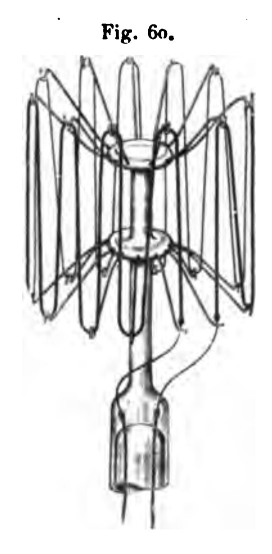


par un crochet agrafant le filament. Au régime de 1,5 watt par hefner, cette lampe donnait 30 hefners à la tension de 94 volts. Sa vie absolue fut de 260 heures pendant lesquelles l'intensité lumineuse diminua de 9,5 pour 100.

Une lampe analogue fut construite au mois d'octobre 1903 pour 220 volts. Le filament, de 1350^{mm} de longueur, est porté par deux étoiles à 16 branches (*fig.* 58). Elle donnait 50 hefners environ.

Finalement, on a adopté le dispositif de la figure 59, qui représente en grandeur la lampe actuelle, à filament de tantale, de 25 hefners à 110 volts, consommant 1,5 watt par hefner. Le fil de tantale, de 0^{mm},05 de diamètre et de 650^{mm}

Fig. 60.



de longueur, est monté en zigzags sur les crochets de deux étoiles à 11 et 12 branches dont les centres sont constitués

Fig. 61 et 62.

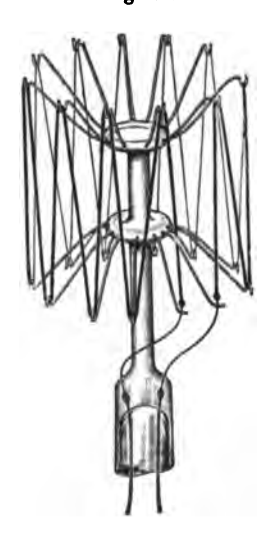


par des épanouissements, en forme de lentille, d'une tige de verre prolongeant le tube par lequel les fils de platine pénètrent dans l'ampoule. La figure 60 montre l'ensemble du

filament et de son support. Le poids du fil de tantale est de $0^{g},022$, de sorte que 1^{kg} de tantale permet de fabriquer 45000 lampes.

Cette lampe, soumise à une tension croissant lentement, ne brûle qu'entre 260 et 300 volts. Sous l'action de la haute température, le filament de tantale, bien cylindrique à l'origine (*fig.* 61), perd sa forme régulière (*fig.* 62). En même temps, sa longueur diminue et les parties arrondies de la figure 60 deviennent anguleuses (*fig.* 63).

Fig. 63.



Au régime de 1,5 watt par hefner la vie utile de la lampe, pour une réduction de l'intensité lumineuse de 20 pour 100, est de 400 à 600 heures.

Pendant les premières heures de fonctionnement, on constate une augmentation de l'intensité lumineuse, accompagnée d'un accroissement du courant absorbé. Ce phénomène est dû au changement de structure du fil de tantale ayant comme conséquence une réduction de la résistance.

Le Tableau suivant indique les variations de l'intensité lumineuse, du courant et de la consommation spécifique pendant la vie d'une lampe.

DURÉE d'incandescence en heures.	INTENSITÉ lumineuse horizontale en hefners.	COURANT en ampères.	CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.
0	25-27	0,36-0,38	1,5-1,7
5	28-31	0,37-0,39	1,3-1,5
150	25-27	0,36-0,38	1,5-1,6
300	22-24	0,36-0,38	1,6-1,7
500	20-22	0,36-0,38	1,9-2,0
1000	18-20	0,35-0,37	2,1-2,2

La lampe à filament de tantale peut fonctionner dans toutes les positions.

Il arrive parfois qu'après une certaine durée d'incandescence le filament se rompe en un ou plusieurs points. En imprimant alors à la lampe des secousses convenables, on parvient à amener les bouts brisés en contact avec les parties

Fig. 64.

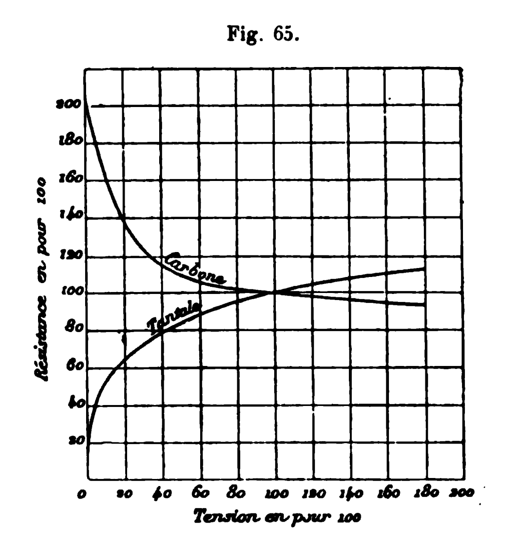
voisines. La lampe peut alors continuer à fonctionner (*fig.* 64).

Un vide très élevé dans l'ampoule est nécessaire pour soustraire le filament à l'oxydation et pour supprimer les

pertes de chaleur qui se produiraient par conduction à travers l'espace gazeux.

Les lampes Siemens et Halske à filament de tantale de 25 hefners nominaux à 110 volts, s'établissent aussi avec ampoule dépolie. Cette modification réduit l'intensité lumineuse horizontale de la lampe de 10 à 15 pour 100 et accroît la consommation spécifique de 11 à 18 pour 100.

Fig. 65.



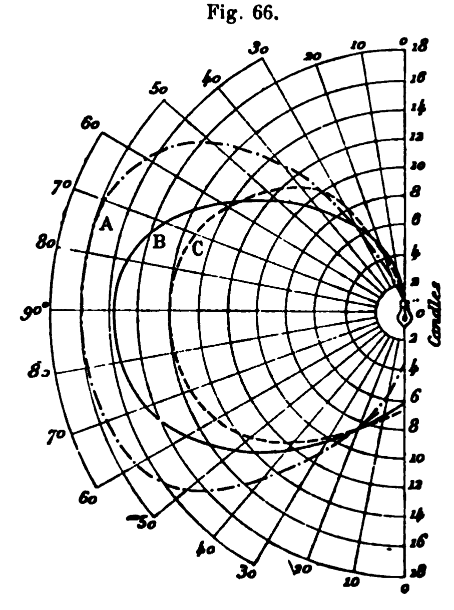
Les diagrammes de la figure 65 représentent les variations de la résistance d'un filament de tantale et d'un filament de carbone. On a porté en abscisses les tensions en pour 100 de la tension normale, et en ordonnées les résistances en pour 100 de la résistance à la tension normale. Le coefficient de température du tantale étant positif, l'intensité lumineuse de la lampe est beaucoup moins sensible aux variations de tension que celle de la lampe à filament de carbone (*voy.* Chap. I, p. 52 et suiv.).

Le prix en gros de la lampe de 25 hefners 110 volts, qui était d'environ 5[fr] à l'origine, est déjà tombé à 3[fr] vers le milieu de 1906.

Les diagrammes de la figure 66, déterminés par le professeur W. Ambler, représentent la distribution du flux

lumineux dans un plan méridien pour trois lampes à incandescence.

Fig. 66.



A. Lampe à filament de tantale de 25 hefners, ou 22 candles, à ampoule claire, absorbant 0,35 ampère à 110 volts, soit 38,5 watts;

B. Lampe à filament de tantale de 25 hefners nominaux, à ampoule dépolie, absorbant 0,36 ampère à 110 volts, soit 39,6 watts;

C. Lampe à filament de carbone de 16 candles, consommant 3,1 watts par candle horizontale.

MM. A.-E. Kennelly et S.-E. Whiting ont mesuré la résistance d'une lampe au tantale Siemens et Halske de 25 hefners, ou 22 candles, à 110 volts, à ampoule dépolie, pour diverses tensions.

Les résultats de ces mesures sont consignés dans le Tableau suivant :

Tension, en volts....	env. 0	20	40	60	80	120	143,3
Résistance, en ohms.	55	180	225	250	270	300	316,8

La résistance initiale, à la température du laboratoire et sous une très faible tension, est d'environ 55 ohms. La plus haute valeur observée est 316,8 ohms à 143,3 volts, mais la résistance est encore croissante en ce point.

Un accroissement de tension de 5 pour 100 au-dessus de la valeur normale produit une augmentation de courant de 3,75 pour 100. A 20 volts un accroissement de tension de 5 pour 100 augmente le courant de 2,75 pour 100. La lampe commence à devenir lumineuse à 9,5 volts, soit à environ 9 pour 100 de la tension normale.

Les lampes à filament de tantale alimentées par un courant alternatif ont une vie plus courte que si elles fonctionnaient par courant continu.

Le professeur Clifford (*The El. World*, 16 juin 1906) indique les résultats d'essais suivants :

Sur 10 lampes au tantale, dont 5 à ampoule claire et 5 à ampoule dépolie, soumises à la fréquence de 133 périodes par seconde, aucune n'a atteint une vie supérieure à 99 heures. La vie moyenne a été de 37 heures pour les lampes claires et de 46 heures pour celles dépolies.

A la fréquence de 60 périodes par seconde, la vie maximum a été de 308 heures, la vie moyenne étant de 178 heures pour les lampes claires et de 129 heures pour les lampes dépolies.

CHAPITRE VI.

LAMPE NERNST.

Nous avons vu précédemment que plusieurs inventeurs, poursuivant l'amélioration du rendement lumineux des lampes à incandescence, ont recherché, pour la confection du filament, des substances non métalliques, éminemment réfractaires, capables de supporter pratiquement une température beaucoup plus élevée que le filament de carbone, et douées de propriétés sélectives de longueurs d'onde aussi marquées que possible, comme le manchon Auer à incandescence par le gaz.

Parmi les premières expériences dans cette direction, on peut citer les essais de confection de filaments en sels de terres rares par la fabrique de lampes à incandescence Langhans, de Berlin.

Un brevet, déposé par Edison le 31 mars 1898, a pour objet l'échauffement d'un filament de matière réfractaire à un point où celle-ci devient conductrice. A cet effet, il incorpore des substances carbonées à la matière réfractaire. Pour une certaine tension, de petits arcs s'établissent entre les particules de carbone et échauffent la masse réfractaire qui devient alors conductrice.

Un brevet, déposé en Angleterre le 31 mars 1898, par M. Ritter von Welsbach, indique l'emploi d'un oxyde réfractaire mélangé à un agglutinant carboné. La pâte est mise, par compression au travers d'une filière, sous forme de fil que l'on sèche et que l'on cuit. Dans la calcination, le carbone superficiel brûle et l'oxyde reste seul à la surface.

Les deux lampes précédentes d'Edison et de Welsbach sont indiquées comme fonctionnant dans le vide.

M. Bainville (*Soc. Int. Electr.*, 3 mai 1905) cite, parmi les brevets relatifs à cette classe de lampes, ceux de :

Howland (1899). Filament constitué par une tresse de coton enduite de sels terreux, puis flambée;

Deselle et Demort (1899). Filament formé de sels terreux, agglomérés au moyen de cellulose dissoute, puis carbonisé;

Frénot (1904) et Madaillon (1904). Identiques aux précédents;

Canello (1904). Filament formé d'une matière poreuse imprégnée de sels métalliques que l'on réduit ensuite à haute température.

Les métalloïdes de la famille du carbone, le silicium et le bore, ainsi que l'azoture de bore proposé par Just, ont été expérimentés, mais n'ont pas donné de résultat. Les carbures de métaux très réfractaires : thorium, zirconium, vanadium, yttrium, titane, tantale, ont été essayés sans succès.

L'expérience a montré que les filaments formés de composés binaires, tels que des oxydes, portés à l'incandescence dans le vide, ont tendance à se dissocier et se trouvent, par suite, dans un état d'équilibre instable. Les filaments composés d'oxydes doivent donc fonctionner à l'air libre.

On a essayé de mélanger du carbone à la pâte d'oxydes réfractaires, afin de rendre le filament plus conducteur à froid; mais, à la température élevée de l'incandescence, le carbone réduit les oxydes en donnant naissance à des carbures.

C'est au professeur Walther Nernst que revient l'honneur d'avoir réussi à créer une lampe pratique à corps incandescent composé d'oxydes réfractaires.

M. Nernst déposa sa première demande de brevet sur le principe de sa lampe, en 1897, brevet qui lui fut accordé au printemps de 1899. Deux ans plus tard il obtint des brevets de détail. Vers 1898, M. Nernst céda une licence pour sa lampe à la Compagnie Westinghouse. Les détails de construction de cette lampe firent alors l'objet d'une étude approfondie de la part des Ingénieurs de cette Société.

La fabrication industrielle de la lampe Nernst présentait de grandes difficultés dont les principales sont : 1° la purification et la préparation du composé de terres rares pour les filaments en quantités relativement importantes; 2° la régu-

lation; 3° le chauffage préalable du filament pour l'amorçage de la lampe; 4° la rupture automatique du circuit de chauffage; 5° l'établissement des connexions du filament avec les conducteurs amenant le courant.

L'un des premiers brevets relatifs à la lampe Nernst indique que le mélange qui possède à un haut degré les qualités requises pour le corps lumineux (Brenner, glower) a la composition suivante :

	Pour 100.
Oxyde de zirconium	80
Oxyde d'erbium	10
Oxyde d'yttrium	10

Ces oxydes sont réduits en poudre fine, mélangés intimement, puis mis en pâte à l'aide d'une solution aqueuse de gomme adragante, de dextrine, d'amidon ou d'un autre agglutinant.

Dans les brevets ultérieurs il est spécifié que l'on obtient d'excellents résultats avec les mélanges suivants :

	Pour 100.
Oxyde de zirconium	70
Oxyde d'yttrium	30
Oxyde de zirconium	10
Oxyde de thorium	70
Oxyde d'yttrium	20
Oxyde de thorium	70
Oxyde d'yttrium	30
Oxyde de cérium	0,5
Oxyde de thorium	80
Oxyde d'yttrium	19,5

Ces proportions peuvent être modifiées dans une grande mesure. Les brevets indiquent aussi la magnésie comme convenant à la fabrication du corps lumineux. Certaines terres rares ont été rejetées comme étant insuffisamment réfractaires.

Les principaux minerais de ces oxydes sont : divers silicates de zirconium, tels que le zircon, la cérite, la thorite, la galodinite et la smarskite de la Caroline du Nord. Ces minéraux sont constitués, dans leur partie essentielle, par des silicates de ces métaux.

Il est indispensable que les matières qui entrent dans la composition de la pâte ne renferment aucune substance étrangère. Les réactifs employés dans le traitement des minerais doivent donc être absolument purs. On doit se servir d'eau distillée pour la confection de la pâte, car l'eau ordinaire introduirait de la chaux dont la température de volatilisation est inférieure à celle des terres rares adoptées.

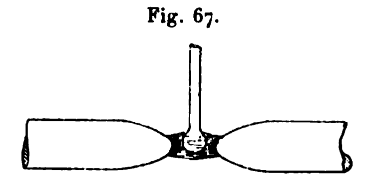
On file la pâte en la comprimant au travers d'une filière. Le cylindre ainsi obtenu est séché, et il doit avoir dans cet état la densité la plus grande possible. On le coupe en morceaux de longueur convenable, puis on porte ceux-ci graduellement à une température excessivement élevée. Cette cuisson s'opère dans une nacelle d'iridium placée dans un creuset de magnésie que l'on chauffe au chalumeau oxhydrique. L'agglutinant est détruit et l'on retire de petits cylindres blancs, durs.

La liaison du bâtonnet d'oxydes avec les fils métalliques amenant le courant présentait une grande difficulté qui a été surmontée par le procédé ingénieux suivant dû à M. Marshall W. Hanks :

1° On coupe la tige d'oxydes à une longueur convenable, supérieure à celle que doit avoir le bâtonnet terminé;

2° On soumet l'une des extrémités de la tige à un arc

Fig. 67.



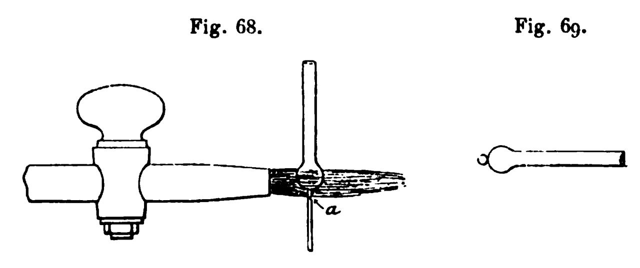
électrique (*fig.* 67). La matière se ramollit et prend la forme sphérique;

3° On chauffe la petite boule ainsi obtenue dans la flamme du chalumeau oxhydrique en même temps qu'un fil de platine portant une saignée *a*, près de l'extrémité (*fig.* 68). Le platine fondant forme une petite perle qui adhère à la tige d'oxydes (*fig.* 69);

4° On fond dans l'arc électrique la petite sphère d'oxydes

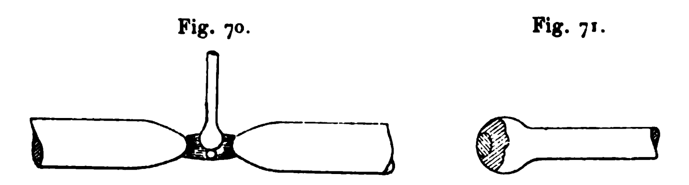
(*fig.* 70) de façon à y faire pénétrer la perle de platine (*fig.* 71) qui se trouve de la sorte en contact intime avec la tige réfractaire ;

Fig. 68. Fig. 69.



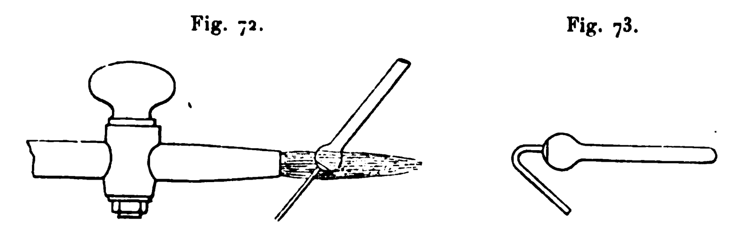
5° On chauffe au chalumeau oxhydrique l'extrémité de la tige et on lui présente en même temps le fil de platine destiné

Fig. 70. Fig. 71.



à amener le courant (*fig.* 72 et 73), de façon à souder celui-ci avec la petite masselotte de platine ;

Fig. 72. Fig. 73.



6° Enfin, on soude une tige d'aluminium au fil de platine.

Pour exécuter la seconde connexion il faut régler la longueur du bâtonnet. M. Hanks obtient ce résultat de la manière pratique suivante : les bâtonnets, terminés à l'une de leurs extrémités comme nous venons de l'expliquer, sont suspendus verticalement au limbe d'un plateau dont l'axe est légèrement incliné sur la verticale. En faisant tourner ce plateau d'un certain angle on amène l'extrémité brute du bâtonnet dans

l'arc électrique. Une lentille donne sur un écran l'image agrandie du bout du bâtonnet dans l'arc, ainsi que celle d'un trait de repère. La partie ramollie par l'arc prend la forme d'une sphère de plus en plus grosse, de telle sorte que la longueur de la tige d'oxydes diminue. Quand la sphère devient tangente au trait de repère le bâtonnet a la longueur voulue. On fait alors tourner le plateau d'un cran pour régler un deuxième bâtonnet.

La perle de platine est scellée ultérieurement.

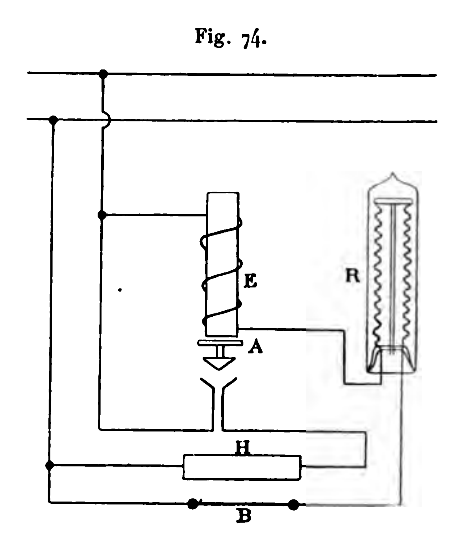
L'opération précédente donne aux bâtonnets leur longueur exacte, mais elle ne permet pas de les régler pour la même tension. On les classe par catégories d'après la tension indiquée par un voltmètre pour un courant donné mesuré par un ampèremètre en série avec le bâtonnet. En service, celui-ci sera partiellement protégé contre le refroidissement par l'ampoule dans laquelle il sera enfermé ou encore, dans certaines lampes, il sera chauffé par le rayonnement des tiges incandescentes voisines. La tension d'essai, devant porter le bâtonnet à la même température que dans le fonctionnement normal, est plus élevée que la tension normale. On range les bâtonnets par paquets de dix, sur lesquels on inscrit la tension à laquelle ceux-ci doivent fonctionner.

La tige d'oxydes réfractaires possède à froid une résistance extrêmement élevée qui diminue au fur et à mesure que la température croît. Pour allumer une lampe Nernst sous la tension normale, il est donc nécessaire de chauffer préalablement le bâtonnet jusqu'à une certaine température. Celle-ci doit être telle que la résistance correspondante R de la tige d'oxydes soit assez faible pour que la puissance RI^2 reçue soit supérieure à la puissance totale qu'il rayonne, de telle façon que sa température croisse progressivement jusqu'à sa valeur normale.

On obtient ce résultat en disposant très près du bâtonnet, et en quantité avec lui, une résistance faisant office de réchauffeur (heater) (*fig.* 74). Lorsqu'on ferme le circuit de la lampe, le bâtonnet froid n'étant pas conducteur, tout le courant passe d'abord par la résistance de chauffage H. La tige B s'échauffant devient peu à peu conductrice et laisse passer un certain

courant. Dès que celui-ci a atteint une valeur fixée d'avance, suffisante pour assurer l'allumage de la lampe, l'armature de

Fig. 74.



fer doux A de l'électro-aimant E, dont il traverse l'enroulement, est attirée et coupe le circuit du réchauffeur. Ce dernier absorbe donc de l'énergie seulement pendant la courte durée de l'allumage.

Nous venons de voir que la résistance de la tige de terres rares varie en sens inverse de la température. Or, il se produit qu'à la température la plus favorable pour le fonctionnement, cette résistance diminue très rapidement lorsque le courant croît. Il en résulte qu'en ce point particulier une légère augmentation de la tension pourrait réduire la résistance dans une mesure telle que le courant devînt assez intense pour brûler le bâtonnet.

Le fer possède la propriété inverse d'acquérir une résistivité croissant avec la température. De plus, pour une valeur critique de la température, cet accroissement de la résistivité est très considérable pour un accroissement relativement faible de la température. M. Nernst utilise cette particularité en montant une résistance en fil de fer B (balast) en série avec le bâtonnet. On choisit un fil de fer de dimensions telles

que le courant normal le porte dans le voisinage de la température critique et qu'un accroissement de courant augmente sa résistance d'une quantité sensiblement égale à celle dont la résistance de la tige d'oxydes diminue.

La courbe représentant la tension aux bornes du bâtonnet, en fonction du courant, est presque parallèle à l'axe des abscisses dans le voisinage du courant normal. Une faible variation de tension produirait donc dans le bâtonnet seul en circuit une forte variation de courant. La courbe de la tension aux bornes du rhéostat de fil de fer, au contraire, a une direction presque parallèle à l'axe des ordonnées pour le courant normal, c'est-à-dire qu'en ce point une grande variation de tension ne produirait dans le rhéostat seul en circuit qu'une faible variation de courant. Ce second effet prédomine, de telle sorte qu'une variation relativement importante de tension ne détermine qu'une faible variation de courant dans la lampe.

En pratique on donne au rhéostat de stabilité des dimensions telles qu'il produise une chute de 10 à 12 pour 100 de la tension aux bornes de la lampe. La perte dans l'enroulement de l'interrupteur automatique est d'environ 1 pour 100 de la tension totale.

Le diamètre du fil de fer varie entre $\frac{1}{40}$ de millimètre dans les plus petites lampes et $\frac{1}{10}$ de millimètre dans les plus grosses, et sa longueur entre 100 et 300 millimètres. Le rhéostat a une résistance de 25 à 80 ohms suivant les lampes.

Le fil de fer, enroulé en hélice, est fixé aux extrémités d'une traverse métallique portée par une tige de nickel. Ce rhéostat est enfermé dans un tube de verre dans lequel on fait le vide et qu'on remplit d'hydrogène sec, à la pression atmosphérique. Ce gaz, obtenu par l'électrolyse d'une solution alcaline, a pour fonction de faciliter le refroidissement du fil de fer par conduction. Pour une lampe à trois bâtonnets le tube de verre renfermant la résistance a encore des dimensions très réduites, soit environ $17^{mm},5$ de diamètre et 56^{mm} de longueur.

L'organe de chauffage s'obtient en enroulant un fil de platine de $0^{mm},03$ à $0^{mm},05$ de diamètre sur un cylindre de kaolin cuit préalablement. On enrobe alors le fil de platine ainsi enroulé dans de la pâte de kaolin, et la baguette consti-

tuée de la sorte est soumise à une deuxième cuisson; puis elle est portée à une température suffisante pour la ramollir et mise sous la forme appropriée au moyen d'un moule : zigzag que l'on dispose au-dessus de la tige d'oxyde horizontale, hélice dont on entoure le bâtonnet vertical. La porcelaine ayant sensiblement le même coefficient de dilatation que le platine ne se fendille pas.

Le bâtonnet et le réchauffeur sont fixés sur une base de porcelaine.

L'interrupteur automatique (*cut off*), dont la fonction est de couper le circuit de chauffage dès que la lampe est amorcée, se compose d'un électro-aimant droit dont l'enroulement est monté en série avec le bâtonnet et le rhéostat régulateur. Les bornes *a*, *b* sont connectées aux extrémités

Fig. 75.

du réchauffeur, tandis que les bornes A, B sont reliées respectivement aux deux bornes de la lampe. A la mise en circuit de celle-ci, deux armatures de fer doux mobiles autour des axes O, O′, et agissant sous l'influence de la pesanteur, relient A et *a*, B et *b*, de telle sorte que le réchauffeur fonctionne. La résistance de la tige d'oxydes diminuant alors progressivement, il arrive un moment où l'électro-aimant est suffisamment fort pour attirer les armatures de fer doux qui prennent la position verticale indiquée en pointillé sur la figure 75, et le réchauffeur se trouve complètement isolé. Les contacts des bornes *a*, *b* et des deux armatures de fer doux sont garnis d'argent.

L'interrupteur automatique pour une lampe à trois bâtonnets pèse 86^{g} et a comme dimensions d'encombrement 56^{mm} × 48^{mm} × 21^{mm}. La bobine est imprégnée d'un composé minéral capable de supporter une température élevée et est recouverte d'une enveloppe d'amiante.

La lampe Nernst donne une lumière très blanche, en raison de la température extrêmement élevée de son organe incandescent, estimée entre 2200° C. et 2450° C. suivant les auteurs.

La lampe de 25 bougies à 110 volts a un seul bâtonnet de 0^{mm},64 de diamètre et de 16^{mm} de longueur. Elle absorbe un courant de 0,427 ampère.

La lampe de 30 bougies à 220 volts a un bâtonnet unique de 0^{mm},36 de diamètre et de 30^{mm} de longueur.

Une lampe de 200 bougies à 220 volts a trois bâtonnets en quantité, de 0^{mm},64 de diamètre et de 30^{mm} de longueur.

Une lampe de 500 bougies à 220 volts a six bâtonnets en quantité, de 0^{mm},64 de diamètre et de 30^{mm} de longueur.

M. von Gaisberg a fait, d'avril à juin 1904, une série d'expériences sur des lampes Nernst modèle B, de 110 volts, provenant de la succursale de la *Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft,* à Hambourg.

Le bâtonnet est horizontal et placé devant la résistance de chauffage qui est appliquée sur la base de porcelaine. Les mesures photométriques ont été prises suivant l'axe de la lampe enfermée dans un globe opale. Le bâtonnet est établi pour 95 volts et la résistance régulatrice, pour 15 volts. La tension aux bornes de la lampe était mesurée par un voltmètre enregistreur.

Le Tableau suivant reproduit les résultats de ces mesures. La valeur notablement supérieure de l'intensité lumineuse pendant les premières heures est sans importance.

La diminution du nombre de lampes de 0,5 ampère en service après 300 heures de fonctionnement indique la rupture de la tige d'oxydes d'une ou de plusieurs lampes. Grâce au globe opale, on peut admettre, d'après des mesures faites, que la répartition du flux lumineux est pratiquement uniforme dans un cône dont les génératrices font un angle

NOMBRE de lampes.	DURÉE de fonctionnement en heures.	TENSION MOYENNE aux bornes des lampes en volts.	PUISSANCE ABSORBÉE en watts.	INTENSITÉ LUMINEUSE dans l'axe de la lampe en hefners.	CONSOMMATION spécifique en watts par hefner.	RÉDUCTION de l'intensité lumineuse par rapport à l'intensité lumineuse après 25 heures, en pour 100.
Lampes intensives. Modèle B. 110 volts, 0,25 ampère.						
10	0	111,0	30,7	19,7	1,6	»
10	25	109,3	29,8	14,1	2,1	»
10	50	110,1	30,5	12,3	2,5	14
10	75	109,9	30,0	12,4	2,4	14
10	100	109,6	29,5	12,6	2,3	13
10	200	109,9	29,5	12,2	2,4	15
10	300	109,9	28,8	12,3	2,3	15
10	400	110,0	26,7	9,4	2,8	35
10	500	112,0	27,1	10,5	2,6	27
10	600	110,1	22,3	7,0	3,2	51
10	700	110,4	21,5	6,2	3,5	57
Lampes intensives. Modèle B. 110 volts, 0,5 ampère.						
10	0	110,5	57,4	44,4	1,3	»
10	25	112,0	57,4	29,7	1,9	»
10	50	109,3	55,8	28,7	1,9	3
10	75	110,3	55,5	26,5	2,1	11
10	100	109,5	55,5	27,7	2,0	7
10	200	109,1	54,6	27,9	2,0	6
10	300	109,4	53,4	24,0	2,2	19
9	400	110,4	53,7	23,6	2,3	20
9	500	111,1	53,1	24,4	2,2	18
7	600	111,4	49,3	19,6	2,5	34
6	700	110,2	42,7	14,4	3,0	51

de 45° avec l'axe de la lampe, de telle sorte que l'intensité lumineuse à l'intérieur de ce cône est égale à celle suivant l'axe, indiquée sur le Tableau.

Après quelques heures de fonctionnement la consommation spécifique est voisine de 2 watts par hefner suivant l'axe de la lampe, correspondant à une consommation spécifique d'environ 2,6 watts par hefner hémisphérique.

Des expériences antérieures avaient été effectuées de février à décembre 1903 sur 27 lampes Nernst à bâtonnet vertical entouré de l'hélice de chauffage, à 220 volts, dont 200 volts aux bornes de la tige d'oxydes et 20 volts dans la résistance additionnelle. Ces lampes éclairaient une promenade publique. Les mesures photométriques ont été prises perpendiculairement au bâtonnet, sans globe.

Le Tableau ci-après indique les moyennes des résultats. Les mesures ont été faites au début, puis après 300 heures de fonctionnement. On a employé pendant les essais 163 bâtonnets dont 92, soit 56 pour 100, étaient encore en service après 300 heures.

Puissance absorbée au début, en watts.........	107
Puissance absorbée après 300 heures, en watts..	103
Intensité lumineuse au début, en hefners........	86
Intensité lumineuse après 300 heures, en hefners.	60
Diminution de l'intensité lumineuse après 300 heures, en pour 100......................	30
Consommation spécifique en watts par hefner, au début................................	1,2
Consommation spécifique en watts par hefner, après 300 heures..........................	1,7

Dans la lampe à 110 volts le bâtonnet absorbe 95 volts, tandis que la chute de tension dans la résistance de stabilité et l'interrupteur automatique est de 15 volts, soit environ 13,6 pour 100 de la tension totale. Dans la lampe à 220 volts le bâtonnet absorbe 200 volts et la perte dans le rhéostat régulateur et l'interrupteur automatique est de 20 volts seulement, soit environ 9 pour 100 de la tension aux bornes.

Le rendement de la lampe Nernst s'améliore lorsque le nombre de bâtonnets dans la même ampoule augmente. Cet effet est dû probablement à ce que le refroidissement est

relativement d'autant moins important que les tiges incandescentes sont plus nombreuses.

Lorsque le bâtonnet est usé on le remplace par un neuf.

L'allumage des lampes Nernst exige un certain temps. Pour supprimer, ou tout au moins atténuer cet inconvénient, on a construit des lampes *Express*. A la fermeture du circuit, des lampes à filament de carbone, ordinaires, s'allument, fournissant ainsi un éclairage immédiat. Un interrupteur automatique les éteint dès que la lampe Nernst est allumée.

En dehors des phénomènes de dilatation et de contraction, produits par l'allumage et l'extinction, qui tendent à désagréger le bâtonnet, on constate que celui-ci se contracte en service, par suite d'une cuisson complémentaire. On donne au fil de platine du pôle négatif une longueur suffisante pour permettre l'expansion et la contraction.

Les fils de platine amenant le courant à la tige d'oxydes se volatilisent peu à peu. La température étant plus élevée au pôle positif, on donne au fil de platine de ce pôle un diamètre plus grand qu'à celui du pôle négatif, ces deux conducteurs devant avoir la même durée de fonctionnement que le bâtonnet. Les lampes construites pour courant continu doivent donc être montées dans un sens déterminé.

Suivant M. Murray C. Beeble, le bâtonnet, en vertu de sa haute incandescence, ionise l'air qui l'environne, de telle sorte qu'une partie seulement du courant aux bornes de la lampe traverse la tige d'oxydes, le reste du courant se rendant d'une borne à l'autre à travers le gaz.

Au début de l'étude de la lampe Nernst on avait constaté qu'une fraction du courant entrant dans le bâtonnet fuyait à travers l'air ambiant pour se rendre à la résistance de chauffage. On a supprimé cette fuite en isolant complètement le réchauffeur de la canalisation au moyen d'un interrupteur automatique double.

M. Beeble estime que le phénomène de conduction du courant, dans la baguette de terres rares, est de nature électrolytique et qu'il se produit une sorte de polarisation du bâtonnet.

CHAPITRE VII.

LAMPE A VAPEUR DE MERCURE.

I. — Historique et principe de la lampe a vapeur de mercure.

Nous avons vu que dans les lampes à filament de carbone graphité, d'osmium, de tantale, l'augmentation du rendement lumineux a été obtenue principalement par un accroissement de la température. Malheureusement, on est bientôt arrêté dans cette voie de progrès par l'impossibilité de trouver des corps solides capables de résister, dans des conditions économiques, à une température suffisamment élevée pour assurer un bon rendement lumineux.

Dans la lampe Nernst, l'augmentation de la température du corps lumineux est très importante. Mais la nécessité où l'on se trouve de faire fonctionner le corps incandescent dans l'air libre fait perdre en majeure partie le bénéfice que procureraient, au point de vue du rendement, la haute température et les propriétés sélectives du bâtonnet de terres rares.

Quelques inventeurs ont cherché à résoudre le problème de la transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse, en employant un gaz ou une vapeur comme véhicule du courant.

Le tube Geissler n'a pas donné de bons résultats parce que son rendement lumineux n'atteint une valeur raisonnable qu'à des fréquences très élevées, et surtout parce que la masse de matière, fournissant la lumière dans le tube à très grand vide, est trop faible pour permettre d'obtenir, dans les conditions ordinaires, un éclat intrinsèque suffisant. Le tube aurait donc des dimensions exagérées.

Nous avons donné, page 73, un bref historique de la lampe à vapeur de mercure.

La lampe Arons, décrite en 1892, se compose d'un tube de verre en U renversé dont les extrémités sont fermées et contiennent une certaine quantité de mercure, dans lequel pénètrent des fils de platine scellés dans le verre pour l'amenée du courant. On fait dans le tube un vide très élevé. Le mercure distille *de l'anode vers la cathode,* jusqu'à ce que la branche verticale de la cathode soit remplie de mercure, si la quantité de ce métal est suffisante, lequel retourne alors par trop-plein à l'anode.

C'est M. Peter Cooper Hewitt qui, le premier, est parvenu à créer une lampé à vapeur de mercure donnant des résultats réellement pratiques.

Les recherches de M. Cooper Hewitt, sur les tubes à vide, remontent à l'année 1895. Il étudia spécialement les tubes à électrodes de mercure au point de vue de la transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse, avec la plus faible production possible de chaleur.

En donnant des dimensions convenables au tube, dont une seule électrode pouvait être en mercure, et en y pratiquant un vide aussi parfait que possible, il obtint une lampe puissante et à rendement élevé. Il constata que la tension normale était incapable de déterminer le passage d'un courant dans le tube, sans un dispositif spécial, mais, qu'une fois l'amorçage obtenu, le courant continuait à passer dans les conditions normales.

A la suite de nombreuses expériences, il découvrit que la résistance initiale du tube a son siège sur la surface de la cathode, que cette opposition disparaît dès que la surface de la cathode se trouve désagrégée, mais qu'elle se manifeste de nouveau lorsque la désagrégation cesse.

Après avoir amorcé un courant de sens déterminé, dans un tube muni d'une électrode de mercure, il essaya d'inverser ce courant, mais sans succès, parce que l'électrode qui devenait cathode n'avait pas sa surface désagrégée et, par conséquent, n'avait pas perdu sa propriété d'opposition. Il conclut de cette expérience qu'un tube, ayant une électrode de mercure, pouvait constituer une *soupape électrique,* c'est-à-dire un appareil ne laissant passer que des courants d'un sens déterminé.

Il munit une ampoule de verre d'une cathode de mercure et de trois anodes, et connecta ces dernières respectivement aux trois bornes d'une génératrice à courant triphasé montée en étoile, dont le centre était relié à la cathode. Il constata que, seules, les ondes positives de courant passaient aux anodes et se superposaient dans le circuit connectant la cathode au centre de l'étoile en donnant un courant de sens invariable. Grâce au chevauchement des trois ondes, le courant traversant la cathode ne s'annule jamais; la surface de cette électrode est donc maintenue constamment à l'état de désagrégation et, par conséquent, n'a pas tendance à interrompre le courant dans le tronçon commun.

Pour redresser un courant alternatif simple, il construisit une ampoule munie d'une anode et d'une cathode, celle-ci en mercure, et, en outre, d'une troisième électrode auxiliaire voisine de la cathode, qu'il reliait au pôle positif d'une source de courant continu dont le pôle négatif était connecté à la cathode. Une faible puissance, fournie par la source auxiliaire, maintenait la surface de la cathode constamment à l'état de désagrégation. Il obtenait, par ce dispositif, le redressement de la moitié des ondes alternatives, les demi-ondes de sens contraire se trouvant supprimées.

Il parvint encore à redresser, dans une même ampoule, les deux demi-ondes de sens opposé d'un courant alternatif. A cet effet, il munit l'ampoule d'une cathode de mercure et de deux anodes. La source de courant alternatif alimente le primaire d'un transformateur portant deux enroulements secondaires. Ceux-ci étant supposés enroulés dans le même sens, la fin de l'un est reliée au commencement du second, tandis que les deux extrémités libres sont connectées chacune à l'une des anodes de l'ampoule. Les bornes du circuit dans lequel on désire obtenir le courant redressé sont réunies respectivement à la cathode et à la borne commune des deux enroulements secondaires. Chaque demi-onde de tension de la machine à courant alternatif détermine le passage d'une onde de courant toujours de même sens dans l'ampoule, fournie alternativement par l'un des enroulements secondaires du transformateur, puis par l'autre, et pénétrant successivement par chacune des anodes. Pour maintenir la cathode constamment désagrégée, M. Cooper Hewitt em-

pêche le courant de s'annuler en montant une bobine de réactance dans le circuit à courant redressé. Dans ces conditions, la source auxiliaire de courant continu devient inutile et l'appareil se trouve simplifié.

M. Cooper Hewitt obtint donc des convertisseurs soit de courant triphasé, soit de courant alternatif simple en courant redressé. Il fit breveter ces dispositifs et leurs applications aux États-Unis, au mois d'avril 1901.

M. Cooper Hewitt indique dans son brevet de 1900 qu'il emploie dans sa lampe la vapeur de mercure, avec cathode de mercure et anode de fer. Il spécifie qu'on peut adopter l'azote ou d'autres gaz, mais que la vapeur de mercure donne les meilleurs résultats et permet d'obtenir un bon rendement lumineux.

Pour chaque gaz il existe une certaine densité qui donne une résistance électrique minimum. Pour toute valeur supérieure ou inférieure de la densité, la résistance est plus élevée. Le courant absorbé dépend de la tension, de la section et de la longueur du tube, et de la densité du gaz.

M. Cooper Hewitt a fait une série d'expériences en remplaçant le mercure par d'autres corps, et il a obtenu des résultats analogues, mais il a constaté que l'intensité du courant qui doit traverser la cathode pour que la lampe ne se désamorce pas, est d'autant plus grande que la matière constituant la cathode oppose une plus forte résistance à la désagrégation. Toutes les substances, employées comme cathode, manifestent donc le phénomène d'opposition au passage du courant, obstacle que l'on peut toujours surmonter en désagrégeant la surface de la cathode.

Le potassium et le sodium se laissent aisément désagréger, mais les vapeurs de ces métaux alcalins attaquent rapidement le verre du tube. Le graphite n'oppose également qu'une faible résistance à la désagrégation en se réduisant en poussière à la surface.

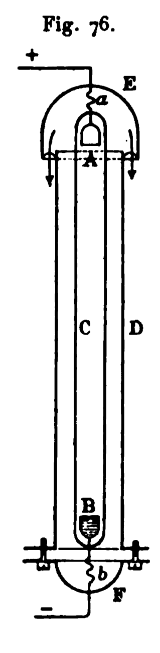
En pratique, le mercure à l'état de pureté est le seul corps que l'on ait trouvé jusqu'ici apte à former une cathode dont la surface puisse être maintenue constamment à l'état de désagrégation, et qui se reconstitue d'elle-même au fur et à

mesure de sa pulvérisation, par le retour au point d'origine des particules projetées, sous l'influence de la pesanteur. Les vapeurs de mercure n'exercent aucune action corrosive sur les parois du tube de verre. Du reste, on choisit pour l'anode une matière inattaquable par le mercure. M. Cooper Hewitt emploie le fer pur, tandis que la *General Electric Company* a adopté le graphite.

L'anode pourrait être de mercure; mais, comme elle tend à chauffer plus que la cathode, il y aurait transport progressif de l'anode à la cathode par distillation du mercure. Nous avons déjà signalé ce phénomène pour la lampe Arons formée d'un tube de verre en U renversé, contenant du mercure dans les deux branches verticales.

La figure 76 représente l'une des premières lampes Cooper Hewitt. Elle se compose d'un tube de verre C de 19^{mm} de

Fig. 76.



diamètre intérieur, fermé à ses deux bouts. Les extrémités sont traversées par deux fils de platine *a*, *b*, fixés l'un à une petite coupe de fer pur A formant l'anode, et l'autre à un

godet B rempli de mercure. La distance entre les électrodes A, B est égale à 1372^{mm}.

Si on laisse trop chauffer le tube, la résistance de l'espace gazeux augmente et peut atteindre une valeur telle que la lampe s'éteigne. Pour limiter l'échauffement, M. Cooper Hewitt enveloppe le tube C d'un second tube D, fermé partiellement aux deux extrémités par des calottes sphériques E, F. Lorsque le tube C chauffe, il détermine dans la gaine annulaire un courant d'air ascendant que l'on règle en faisant varier la hauteur libre du joint inférieur. Cette lampe débite, à la température ambiante de 24° C. et à la tension de 120 volts, un courant de 4 ampères.

M. Cooper Hewitt a simplifié le réglage de la température du tube en logeant l'anode dans une ampoule dont la surface est suffisante pour refroidir et condenser la vapeur de mercure dans la mesure voulue (*fig.* 77).

Fig. 77.

La lampe Cooper Hewitt se compose donc essentiellement d'une enceinte de verre fermée, dans laquelle on a fait un vide élevé, et qui, pendant le fonctionnement, se remplit de

vapeur de mercure, et de deux électrodes dont l'une, la cathode, est toujours du mercure et l'autre, l'anode, est ordinairement de fer. La partie éclairante, ou l'espace gazeux proprement dit rendu lumineux par le passage du courant, est cylindrique. Sa longueur, pour un diamètre donné, est à peu près proportionnelle à la tension. Les lampes de 50 volts ont donc une longueur égale à peu près à la moitié de celle des lampes de 100 volts.

Les lampes Cooper Hewitt sont construites d'ordinaire pour courant continu et pour une intensité de 3,5 ampères.

Les logements des électrodes sont garnis de laine de verre qui les protège contre les coups de marteau du mercure, pendant le transport; ou bien on munit la cathode d'un cône de verre qui amortit les chocs (voir *fig.* 88).

II. — Résistance d'un tube a vapeur de mercure.

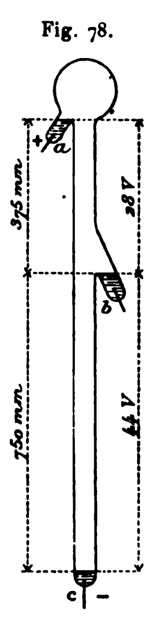
J.-J. Thomson a démontré que la grande résistance d'un tube à gaz raréfié est due principalement au passage entre le gaz et la cathode.

M. Cooper Hewitt a également trouvé qu'il existe une grande résistance de passage entre la vapeur de mercure et la cathode. Son appareil d'expérience (*fig.* 78) se compose d'un tube de verre vertical, de 30^{mm} de diamètre intérieur, surmonté d'une ampoule refroidissante, et muni de trois électrodes *a*, *b*, *c*. Chacune de celles-ci est constituée par une petite poche remplie de mercure dans lequel pénètre un fil de platine traversant le verre. La distance entre les électrodes extrêmes *a*, *c* est de 1125^{mm}, la distance entre *a* et *b* étant la moitié de celle entre *b* et *c*.

Après avoir établi un vide très élevé dans le tube il a fait passer, à l'aide d'un procédé d'amorçage approprié, un courant continu de l'anode *a* à la cathode *c*. Il constata qu'une tension de 72 volts entre les électrodes *a* et *c* donnait alors naissance à un courant de 3,5 ampères, suffisant pour maintenir le tube en fonctionnement. Le mercure s'évaporait, mais il se condensait sur les parois du tube et retombait à la partie inférieure. La cathode se reconstituait ainsi au fur et à mesure de sa destruction.

Dans ces conditions, il a trouvé, à l'aide d'un électromètre, comme tensions entre *a* et *b*, d'une part, et entre *b* et *c*, d'autre part, respectivement 28 volts et 44 volts. Contraire-

Fig. 78.



ment à ce que l'on aurait pu présumer d'après le rapport des distances *ab*, *bc*, la tension entre *b* et *c* est inférieure au double de celle entre *a* et *b*.

M. Cooper Hewitt a alors relié les électrodes *b* et *c* par un circuit de très faible résistance, renfermant un galvanomètre. Cet instrument indiqua un courant de 0,02 ampère dans ce shunt, ce qui dénotait la présence dans le circuit d'une résistance voisine de 2000 ohms. Il a ensuite relié les électrodes *a* et *b* au moyen d'un fil de résistance négligeable; le courant a immédiatement abandonné l'électrode *a* et a pénétré dans le tube seulement par l'anode *b*.

Il a alors supprimé la connexion entre *a* et *b* et intercalé sur chacun des fils amenant le courant en *a* et *b* un rhéostat réglable. Il est arrivé ainsi à partager le courant entre les anodes *a* et *b* dans un rapport quelconque. La partie du tube comprise entre les deux électrodes *a* et *b* se comportait donc comme une simple résistance.

Dans la deuxième expérience le shunt de résistance négligeable est relié directement à la borne de sortie *c*, et le courant, pour pénétrer dans ce shunt, est obligé de passer de la vapeur de mercure à l'électrode de mercure *b*; c'est ce passage qui représente la résistance d'environ 2000 ohms.

La cathode, *dans l'état ordinaire*, oppose donc une grande résistance au passage du courant, tandis que la résistance de l'anode *a* et celle de l'anode de mercure *b* sont faibles. Dans la première expérience la somme des résistances opposées au passage du courant par les électrodes *a*, *c* et par la colonne de vapeur de mercure est

$$\frac{28+44}{3,5} = \frac{72}{3,5} = 20,57 \text{ ohms.}$$

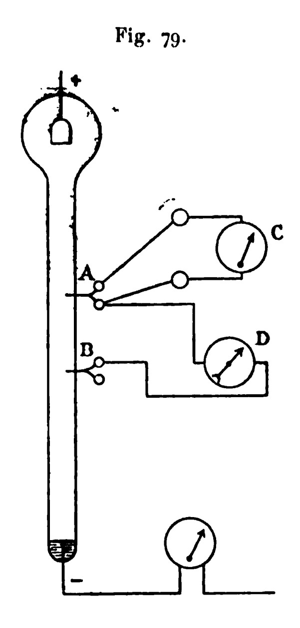
Du reste la troisième expérience montre que l'anode de mercure *b* oppose au courant une plus faible résistance que la colonne de vapeur de mercure *ab*.

MM. Cooper Hewitt et A.-P. Wills (*The El. World and Eng.*, 19 déc. 1903) ont mesuré la conductibilité de la vapeur de mercure à différentes températures. La lampe à vapeur de mercure (*fig.* 79) est disposée dans l'axe d'une gaine verticale de bois, à section carrée. Une seconde gaine identique, placée verticalement à côté de la première, à laquelle elle est reliée par deux canaux horizontaux, renferme une résistance métallique en forme d'hélice dans laquelle on fait passer un courant réglable à l'aide d'un rhéostat. L'air chauffé par cette résistance est mis en circulation dans cette enceinte continue au moyen d'un ventilateur. La température de l'air chaud est indiquée à chaque instant par deux thermomètres placés vers le haut et vers le bas de la lampe et dont les tiges traversent la paroi de la gaine.

Deux couples platine-rhodium A, B, situés à une distance déterminée l'un de l'autre, sont scellés dans le tube de verre dans lequel ils pénètrent jusqu'à l'axe. Ces couples sont connectés à un galvanomètre d'Arsonval C et mesurent la température intérieure. Ils peuvent aussi être reliés aux bornes d'un électromètre, et permettent ainsi de déterminer la différence de potentiel entre les deux points du tube où ils aboutissent.

L'emploi d'un voltmètre électro-statique est nécessaire, car un voltmètre ordinaire absorberait un courant qui ne serait pas négligeable et pourrait donner naissance à des effets d'électrode négative.

Fig. 79.



Lorsque les températures extérieure et intérieure sont égales, on lance le courant dans la lampe en le réglant à la valeur voulue, et l'on mesure la tension entre les bornes potentiométriques. L'expérience a montré que le passage du courant n'influe pas immédiatement sur la densité de vapeur de mercure. Mais on doit exécuter ces mesures assez rapidement pour que la température intérieure ainsi que la densité de vapeur ne varient pas pendant cette opération. Un vide très élevé dans le tube est nécessaire, car la présence d'un gaz autre que la vapeur de mercure fausserait considérablement les résultats.

Un bon rendement de la lampe correspond à une densité donnée. Si l'on fait passer un courant dans la vapeur de mercure à une très faible densité, on n'obtient pratiquement aucune lumière, et la chute de tension pour un même courant est plus faible qu'avec une densité plus grande.

Le rendement lumineux maximum, pour un tube donné, correspond à un rapport défini entre la densité de la vapeur de mercure et le courant.

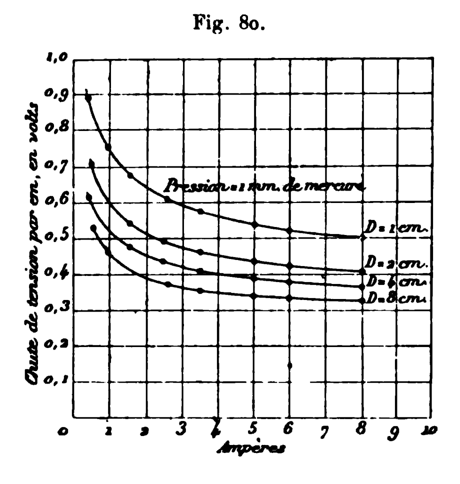
M. Cooper Hewitt indique les valeurs suivantes de la température à différentes pressions de la vapeur de mercure saturée :

Pression de la vapeur, en millimètres de mercure		1	2	3	4	5
Température, en degrés centigr.	Cooper Hewitt	127	143	153	160	165
	von Recklinghausen	125	140,5	150,5	161	168,5

Nous avons aussi inscrit dans le Tableau les valeurs quelque peu différentes de la température publiées par M. Max von Recklinghausen (*E. T. Z.*, 22 déc. 1904).

Les résultats fournis par ces expériences n'obéissent pas à une loi simple. Ainsi, pour une même pression, non seulement la résistance par centimètre de longueur du tube n'est pas en raison inverse des sections ou des carrés des diamètres,

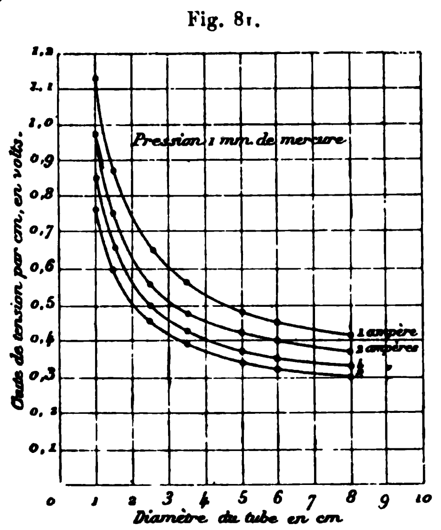
Fig. 80.



mais encore, pour une même pression de vapeur et des densités de courant égales, les chutes de tension par centimètre de longueur de la colonne de vapeur ne sont pas égales dans des tubes de diamètres différents.

Pour un tube donné la chute de tension par centimètre décroît lorsque le courant augmente. Pour un même courant la chute de tension par centimètre diminue quand le diamètre du tube augmente.

Fig. 81.



Le Tableau ci-dessous indique la chute de tension par centimètre de longueur pour divers diamètres de tube et pour différentes pressions de vapeur de mercure.

DIAMÈTRE du tube, en centimètres.	COURANT en ampères.	CHUTE DE TENSION, EN VOLTS PAR CENTIMÈTRE — Pression de la vapeur de mercure, en mm. de mercure. 1.	2.	3.	4.	5.
1,27	0,5	1,14	1,43	1,72	1,94	»
1,27	1	1,03	1,29	1,57	1,77	1,96
2,54	1	0,7	0,91	1,12	1,27	1,4
3,80	1	0,6	0,81	0,95	1,06	1,17
5,08	1	0,54	0,73	0,84	0,96	1,08
2,54	2	0,59	0,78	0,97	1,13	1,27
3,80	2	0,49	0,69	0,87	0,97	1,07
5,08	2	0,43	0,62	0,75	0,84	0,93

Nous empruntons les diagrammes des figures 80 et 81 à un Mémoire de M. Max v. Recklinghausen [*Die Quecksilberlampe und sonstige Quecksilbervacuumapparate* (*E. T. Z.*, 22 déc. 1904)]. Les courbes de la figure 80 représentent la chute de tension par centimètre en fonction du courant, pour différents diamètres du tube et pour la pression de 1^{mm} de mercure. La figure 81 indique la chute de tension par centimètre en fonction du diamètre du tube, pour la pression de vapeur de 1^{mm} de mercure et pour divers courants.

Pour une densité de vapeur de mercure donnée, la section de la zone illuminée croît avec le courant. La section de cette zone diminue lorsque la densité de la vapeur augmente.

M. Cooper Hewitt a trouvé qu'un champ magnétique transversal accroît la résistance de la colonne de vapeur de mercure, surtout pour les faibles densités.

Pour obtenir la valeur de la tension aux bornes de la lampe il faut ajouter à la chute de tension dans la colonne de vapeur de mercure la chute de tension à l'anode et celle à la cathode.

MM. Hewitt et Wills ont mesuré la chute de tension à l'anode à l'aide d'un voltmètre électrostatique connecté à cette anode et à une électrode auxiliaire, très rapprochée de la première et constituée par une pince thermo-électrique qui permettait, en outre, de déterminer la température. M. Wills a publié en août 1904, dans *Physical Review*, les résultats suivants qu'il a obtenus avec un tube de 19^{mm} de diamètre et muni d'une anode de fer.

COURANT en ampères.	CHUTE DE TENSION à la surface de l'anode, en volts.	TEMPÉRATURE DE L'ANODE en degrés centigrades.
1,25	6,25	123
1,75	5,8	143
2,25	5,4	172
2,75	5,1	200
3,25	4,6	243

La chute de tension à l'électrode positive est maximum lorsque la lampe est encore froide.

La méthode précédente ne convient pas à la détermination de la chute de tension à la cathode à cause de l'agitation continuelle de sa surface. On peut alors remplacer le tube par une ampoule de grande section, munie d'une anode et d'une cathode très rapprochées, la chute de tension dans l'espace gazeux étant ainsi négligeable. On mesure la tension totale entre les deux électrodes, puis la chute de tension à l'anode. La différence entre ces deux quantités donne la chute de tension à la cathode. On a trouvé que celle-ci est très sensiblement constante et égale à 5 volts environ.

M. v. Recklinghausen a trouvé pour des ampoules sphériques de grand diamètre avec trajet gazeux court une chute de tension de 8 à 9 volts seulement, même avec des courants supérieurs à 100 ampères.

Des expériences plus récentes que celles de MM. Hewitt et Wills ont montré que la somme des chutes de tension aux deux électrodes est sensiblement indépendante de la valeur du courant et égale à 14 volts environ, la chute à l'anode de fer variant de 7 à 9 volts, celle à la cathode de mercure, de 5 à 7 volts. Si l'on remplace le fer par le mercure à l'anode, la chute à cette électrode s'accroît de quelques volts.

Pour un courant donné l'intensité lumineuse d'un tube augmente avec la pression de la vapeur de mercure qui le remplit. Mais à partir d'une certaine limite la force électromotrice nécessaire pour faire passer ce courant, et par suite aussi la puissance électrique absorbée, croissent plus rapidement que l'intensité lumineuse. Il existe donc une certaine pression de la vapeur de mercure pour laquelle le rendement lumineux est maximum. Cette pression, la plus avantageuse, paraît être voisine de 2^{mm} de mercure correspondant à une température d'environ 140° C. La production de la lumière dans la colonne de mercure semble donc ne pas être un phénomène d'incandescence par la chaleur.

Il résulte de cette observation que la lampe doit avoir des dimensions telles que la chaleur provenant de la transformation de la majeure partie de l'énergie électrique fournie à la

lampe soit dissipée au fur et à mesure de sa production, de façon que la température intérieure se maintienne automatiquement dans le voisinage de 140° C.

Arons a refroidi sa lampe à vapeur de mercure au moyen d'une circulation d'eau.

Dans les lampes Cooper Hewitt primitives, l'échauffement était très considérable, la densité de la vapeur devenait trop élevée. De faibles variations de la tension du réseau ou de la température extérieure exerçaient alors une grande influence sur l'intensité lumineuse et sur la puissance absorbée. Ces lampes étaient sujettes à des extinctions spontanées.

M. Cooper Hewitt a obtenu la surface refroidissante voulue en disposant une chambre de condensation de dimensions appropriées, soit autour de la cathode, soit autour de l'anode, ou encore à la fois autour des deux électrodes. La majeure partie des vapeurs de mercure issues de la cathode se condense sur les parois de ces chambres qui dissipent ainsi une grande partie de la chaleur produite.

Les lampes à vapeur de mercure sont établies actuellement pour un courant de 3 à 4 ampères, généralement 3,5 ampères.

L'amenée d'un courant plus intense aux électrodes au moyen de fils de platine soudés dans la paroi du tube, ainsi que le soufflage du verre, présentent des difficultés. Du reste le courant de 3,5 ampères donne toujours à la lampe une intensité lumineuse importante. D'autre part, pour un courant inférieur à 3,5 ampères, les lampes sont sujettes à des extinctions spontanées.

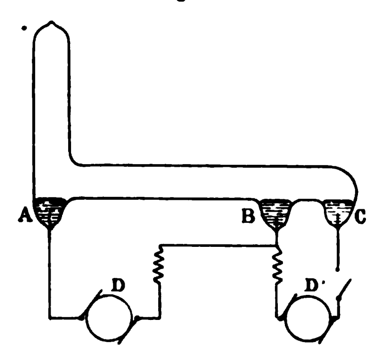
III. — Allumage des lampes a vapeur de mercure.

Lorsqu'on emploie comme milieu conducteur un gaz ou une vapeur métallique, le courant a à produire lui-même les éléments qui doivent le transporter d'une électrode à l'autre. Comme cette matière ionisée n'existe pas au début, il faut avoir recours à quelque artifice pour amorcer la décharge, difficulté que n'offre pas la conduction dans les métaux et les électrolytes.

Considérons un tube de verre horizontal (*fig.* 82) muni de

trois électrodes de mercure A, B, C et d'une branche verticale faisant fonction de chambre refroidissante. Faisons dans

Fig. 82.



ce tube un vide aussi élevé que possible, et expulsons les gaz adhérant aux parois du verre et aux électrodes en chauffant fortement l'appareil.

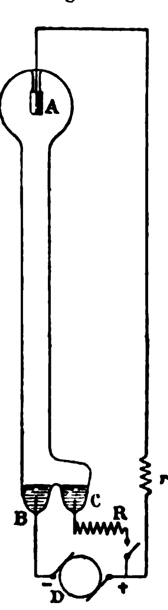
Si nous connectons les électrodes A et B à une source D de force électromotrice continue modérée, 100 ou 200 volts, par exemple, aucun courant ne passe par le tube, que celui-ci soit froid ou qu'il soit chauffé de façon que la vapeur de mercure le remplisse. Pour rendre l'espace gazeux conducteur, c'est-à-dire pour amorcer l'appareil, il faut obtenir, à l'aide de quelque procédé, la présence dans le tube de cations de mercure qui, voyageant de la cathode à l'anode, donneront à l'espace gazeux sa conductance.

Relions les électrodes B et C à une seconde source D' de force électromotrice continue. B étant connectée à la borne négative des deux sources, c'est-à-dire étant la cathode commune, faisons jaillir de C à B un petit arc ou une étincelle, par exemple, en amenant au contact ces électrodes, puis en les séparant. L'étincelle auxiliaire a pulvérisé une petite partie du mercure à la surface de la cathode B en donnant naissance à des véhicules ionisés qui transportent le courant de A en B.

Si maintenant nous inversons les connexions de telle sorte que B devienne l'anode, l'arc auxiliaire BC ne peut pas amorcer une décharge BA parce qu'il ne se produit pas d'ions à la surface de la cathode A reliée à la source D.

On peut utiliser pour l'amorçage la source d'énergie D (*fig.* 83). L'anode auxiliaire C, placée très près de la cathode B, est connectée, par l'intermédiaire d'une grande résistance R,

Fig. 83.



au pôle de la source D. Si l'on imprime une secousse au tube, les deux masses de mercure des électrodes B et C viennent en contact, puis se séparent, d'où il résulte un petit arc dirigé de C en B qui produit la désagrégation de la cathode B et, par suite, détermine l'amorçage de l'arc principal AB. La résistance *r* sert au réglage du courant, comme nous le verrons plus loin.

Les deux expériences précédentes ont été décrites par M. E. Weintraub (*The El. World and Eng.*, 13 mai 1905).

M. Arons et M. Cooper Hewitt ont employé deux méthodes pour amorcer l'arc mercuriel.

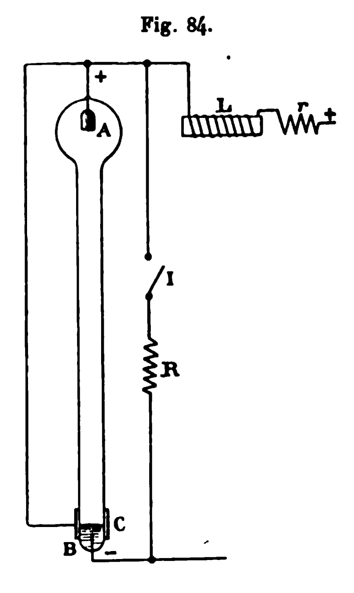
La première consiste à vaincre le grand obstacle opposé au passage du courant avant l'amorçage en appliquant momentanément aux bornes de la lampe une tension élevée. Celle-ci produit une décharge Geissler à travers les traces de

gaz ou de vapeur de mercure contenues dans le tube. L'espace entre les électrodes devient conducteur et l'arc mercuriel s'amorce sous l'action de la force électromotrice normale modérée.

La seconde méthode est celle du contact des deux électrodes, identique au procédé usité pour l'allumage des lampes à arc à charbons. C'est du reste la méthode qui a été employée par les premiers investigateurs de l'arc à mercure dans l'air, en particulier par Rapieff.

1° *Allumage par haute tension.* — Si l'on augmente graduellement la tension aux bornes d'une lampe à vapeur de mercure non encore allumée, on constate que, pour toutes les valeurs de la force électromotrice supérieure à une certaine limite, l'électrode négative se trouve amenée à l'état de pulvérisation et que, si l'on ramène alors graduellement la tension à la valeur normale de fonctionnement, le courant continue à passer.

Fig. 84.

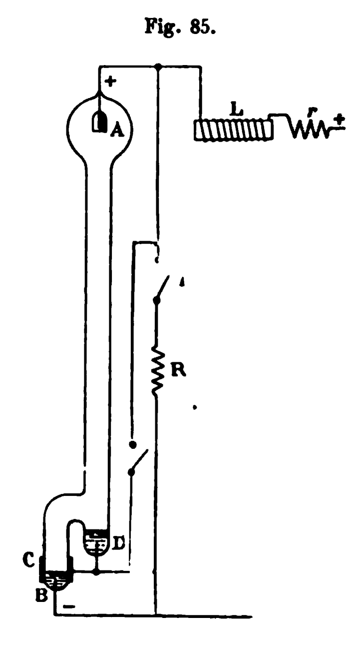


La figure 84 représente le dispositif adopté par M. Cooper Hewitt. Une bobine d'inductance L est montée en série avec la lampe que l'on peut shunter par une résistance R. Un

rhéostat r sert au réglage du courant en régime normal.

Pour produire le choc de haute tension, on ferme l'interrupteur I, qui est de préférence à huile pour que la rupture soit plus brusque. Le circuit rLR se trouve alors parcouru par un courant dont l'intensité est déterminée par la tension E du réseau, d'une part, et par les résistances r et R, d'autre part, l'inductance L n'exerçant aucune influence sur la valeur finale, constante du courant dans le shunt. On ouvre alors brusquement l'interrupteur I. Le courant en s'évanouissant dans la bobine L donne naissance à un potentiel élevé à l'électrode positive A, lequel tend à détruire la cohésion diélectrique des gaz du tube. On facilite la pulvérisation de la cathode de mercure B en entourant celle-ci d'un petit manchon de feuille d'étain C, que l'on relie à l'anode A. On

Fig. 85.



forme ainsi un condensateur dont le mercure et le manchon C sont les armatures et le verre, le diélectrique.

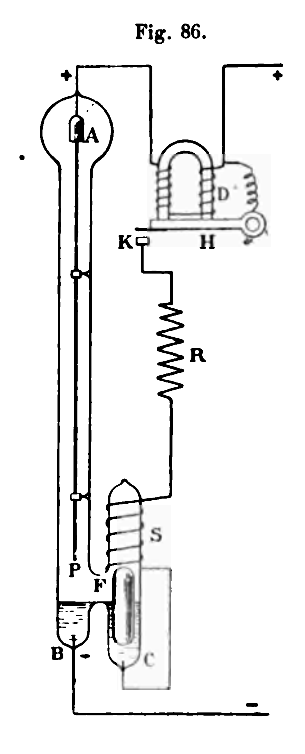
La manœuvre de l'interrupteur I peut évidemment être automatique. La résistance R sert à régler l'intensité du courant

dans la bobine L et, par conséquent, la quantité d'énergie disponible pour l'amorçage.

M. Cooper Hewitt a exposé, en 1902, une variante de ce dispositif dont le but est de réduire la tension nécessaire à l'allumage. A cet effet, le choc de haute tension est donné à une anode auxiliaire D (*fig.* 85) disposée très près de la cathode, de telle sorte que la décharge Geissler n'a à parcourir qu'un court trajet gazeux DB. Aussitôt cette décharge produite, le tube devient conducteur sur toute sa longueur, et la lampe s'allume.

2° *Allumage par contact et séparation d'électrodes.* — La figure 86 représente le dispositif d'amorçage imaginé par

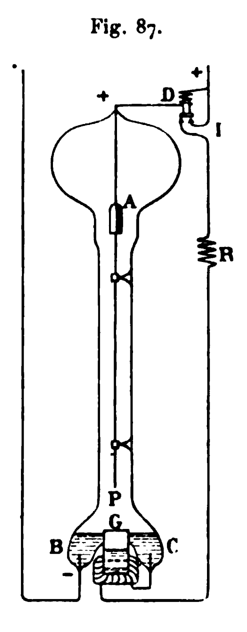
Fig. 86.



M. Weintraub, de la *General Electric Company*. Avant la mise en circuit de la lampe, l'armature H de l'électro-aimant D repose sur le contact K, de sorte qu'à l'instant où

l'on connecte la lampe au réseau le courant passe directement par l'armature K, la résistance R, le solénoïde S, puis se rend au conducteur négatif en traversant le mercure de l'électrode auxiliaire C et de la cathode B, le mercure ayant un niveau assez élevé pour former pont entre ces deux électrodes. Mais à ce moment même le solénoïde S attire le flotteur de fer F, le niveau du mercure baisse dans la branche C, et le pont de mercure se rompt en donnant naissance à un petit arc qui remplit le tube AB de vapeur ionisée. Le courant passant alors par l'anode de graphite A pour se rendre à la cathode B, l'électro-aimant D attire l'armature H qui coupe le circuit auxiliaire d'amorçage.

Fig. 87.



Un filament de carbone P, porté par l'anode A et maintenu de distance en distance par des supports soudés au tube, a pour but de réduire la résistance de la colonne gazeuse au début de l'allumage. Dès que l'arc mercuriel a jailli entre A et B, ce filament, ayant une résistance très grande par rapport à celle de l'espace gazeux ionisé, n'apporte aucun trouble au fonctionnement de la lampe.

R est une résistance dont le rôle est de limiter le courant d'amorçage à une valeur déterminée.

Le dispositif représenté par la figure 87 a été imaginé par M. J.-T. Dempster, de la *General Electric Company*. Lorsqu'on connecte la lampe au réseau, l'armature de l'électro-aimant D fermant l'interrupteur I, le courant se rend du conducteur positif au conducteur négatif en traversant le pont de mercure de très faible épaisseur qui relie les deux électrodes C et B; mais il traverse aussi l'enroulement d'un électro-aimant G dont le noyau de fer en forme d'U enserre le pont de mercure réunissant B et C. Le flux magnétique engendré coupe ce pont en donnant naissance à un petit arc qui amorce le courant de A à B, et celui-ci ouvre l'interrupteur I. Comme dans la lampe précédente, un filament de carbone P facilite l'allumage.

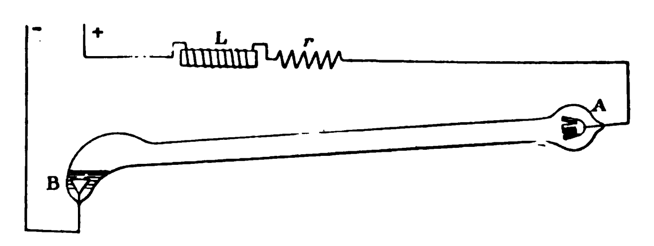
Dans un autre dispositif, le filament de carbone, dans une position excentrique, descend jusqu'à la surface de la cathode et est fixé par son extrémité supérieure à un noyau de fer creux pouvant coulisser sur la tige métallique amenant le courant à l'anode. Ce noyau de fer doux est logé dans un petit tube de verre surmontant l'ampoule de l'anode et formant la carcasse d'une bobine que traverse le courant se rendant à l'anode. Lorsque la lampe est connectée au réseau, le courant passe directement de l'anode à la cathode par le filament de carbone. Mais aussitôt le noyau de fer se trouve attiré et il soulève le filament qui, en émergeant du mercure de la cathode, produit une étincelle qui amorce la lampe.

Le dispositif d'allumage le plus simple est celui adopté par M. Cooper Hewitt et représenté par la figure 88. Le tube AB est porté par une tige de métal supérieure et parallèle, pouvant basculer autour de son milieu et munie à chaque extrémité d'une chaînette.

En tirant sur la chaînette du côté A on incline la lampe, le mercure s'écoule de B en A en formant un mince filet continu qui réunit l'anode A à la cathode B et, par suite, livre passage au courant. On fait alors basculer le tube en sens contraire de façon à amener la cathode B à un niveau inférieur à celui

de l'anode A. Le mercure retourne en B en interrompant le circuit. L'arc qui se produit amorce la lampe.

Fig. 88.



La cathode B se trouvant, en fonctionnement normal, à un niveau inférieur à celui de l'anode, le mercure condensé retourne automatiquement à la cathode.

Le tube doit opposer le plus faible obstacle au flux d'ions émanant de la surface de la cathode. Les parois du verre forment résistance; un tube à trou capillaire ne s'amorce pas par le procédé du petit arc. Ce phénomène est dû à l'action désionisante des corps solides froids, fait observé par M. Weintraub et par d'autres expérimentateurs.

Plus le vide est élevé, plus l'allumage est rapide. La présence de gaz inertes, ou de vapeur de mercure ordinaire inerte, rend l'amorçage lent. La vapeur de mercure ionisée s'élève de la surface de la cathode et se meut le long du tube, gênée par les gaz présents et aussi par la vapeur de mercure ordinaire formée par volatilisation à la surface chauffée de l'électrode négative. Dès que la vapeur ionisée atteint l'anode, l'arc s'amorce, à moins que la pression des gaz étrangers ne soit trop grande. La vapeur de mercure inerte gênant la propagation de la vapeur ionisée, les lampes même à vide parfait s'allument plus difficilement quand elles sont chaudes que lorsqu'elles sont froides.

Il est relativement aisé d'obtenir le vide élevé nécessaire pour l'amorçage instantané, mais il n'est pas facile d'expulser les gaz adhérant aux parois du tube et de l'anode. Le vide diminue donc peu à peu et l'amorçage finit par ne plus s'effectuer pour les tubes longs. On peut assurer l'allumage

instantané même avec une pression de gaz étrangers supérieure à $0^{mm},01$ de mercure, à l'aide du filament de carbone que nous avons mentionné précédemment, fixé à l'anode et aboutissant à une petite distance de la surface de la cathode. Le flux d'ions atteint rapidement le filament. Le faible courant qui s'établit alors entre celui-ci et la cathode facilite l'allumage.

Le filament de carbone réduit en quelque sorte la longueur du tube au moment de l'amorçage et, grâce à sa grande résistance, il ne laisse passer, en fonctionnement normal, qu'un courant insignifiant. Un fil métallique aurait une résistance beaucoup trop faible et fondrait, même s'il était de platine.

L'anode ne joue pas de rôle spécial dans l'amorçage. Elle reçoit simplement les véhicules du courant sans excitation préalable.

Comme dans tous les arcs, un courant minimum est nécessaire pour chaque tension aux bornes pour que l'arc soit stable et ne s'éteigne pas. A 120 volts au réseau et 80 volts entre les électrodes, la limite inférieure du courant est normalement de 3 ampères.

La résistance de l'arc mercuriel diminue lorsque la quantité de vapeur ionisée augmente, et elle croît avec la pression de la vapeur inerte. Si la chambre de condensation est insuffisante pour maintenir la température à la valeur convenable, la quantité de vapeur de mercure inerte produite par la volatilisation de la cathode augmente, ainsi que la pression; la résistance de l'arc croît, le courant diminue et la lampe risque de s'éteindre.

Les gaz étrangers ont une influence analogue à celle de la vapeur de mercure inerte, mais plus prononcée.

L'anode n'a pas d'action appréciable sur la stabilité de l'arc, à moins qu'elle ne soit de mercure, car cette électrode chauffant fortement produirait alors de la vapeur de mercure inerte qui viendrait augmenter la pression dans le tube.

Lorsque la pression des gaz étrangers dans la lampe est

trop élevée, ou si le courant prend une trop grande valeur, celui-ci abandonne l'électrode positive non pas de toutes parts, comme cela a lieu en fonctionnement normal, mais seulement d'un point unique ou d'un petit nombre de points, en donnant de la sorte naissance à un ou plusieurs arcs. La chute de tension à l'anode est alors plus grande que dans les conditions normales; la température de l'anode augmente et peut même déterminer la fusion de cette électrode si elle est métallique.

Pendant l'allumage le courant croît tout d'abord, puis il décroît, augmente de nouveau et atteint enfin une valeur invariable. Au début, l'anode s'échauffant donne lieu à une chute de tension décroissante; la tension disponible dans l'arc même augmente donc et, par suite, aussi le courant. Mais, la vapeur de mercure s'échauffant, sa résistance croît et, par conséquent, tend à réduire le courant. Lorsque la résistance de la vapeur de mercure a atteint une valeur constante, la chute de tension à l'anode continue à diminuer pendant un instant encore, puis l'état de régime s'établit.

M. Weintraub, qui a fait une étude approfondie de l'arc mercuriel, s'est demandé s'il y a transport de matière ou non dans le phénomène d'ionisation de la cathode. L'arc à vapeur de mercure semble à première vue se prêter à la résolution de ce problème, puisque l'arc se produit dans le vide et que le mercure n'éprouve aucune modification chimique. Malheureusement, le phénomène se trouve compliqué par la volatilisation du mercure, par la chaleur dégagée aux électrodes.

Considérons un tube vide d'air, muni de deux électrodes constituées l'une par une coupe contenant du mercure et l'autre par une pièce de graphite ou de toute autre matière ne se combinant pas avec le mercure. Relions *la coupe de mercure au pôle positif* et *la pièce de graphite au pôle négatif* d'une source de force électromotrice. A l'aide d'un dispositif approprié, amenons les deux électrodes au contact, puis séparons-les : un arc se forme ayant l'électrode de mercure comme *anode* et l'électrode solide comme *cathode*. Une lueur se déplace sur la surface de la pièce de graphite, pro-

duisant la désagrégation superficielle. Ce phénomène de désagrégation est caractéristique de la cathode dans l'arc mercuriel dans le vide.

Si la cathode est en charbon de bois, lequel se laisse facilement désagréger, la lueur mobile trace sur la surface de petites stries ressemblant à des brûlures.

La perte de poids de la cathode est si minime que, s'il y a transport de matière, celui-ci est de l'ordre de grandeur défini par la valeur de la masse électronique admise dans les théories modernes.

Les corps solides portés à une haute température rendent les gaz conducteurs. M. Weintraub a observé cet effet pour la vapeur de mercure. Quelques physiciens ont attribué le phénomène d'ionisation de la cathode à l'existence d'une haute température à cette électrode. L'expérience ne confirme pas cette hypothèse. Comme le point d'ébullition du mercure est peu élevé (360° C.), la partie du mercure supposée à une haute température serait nécessairement limitée à la surface lumineuse de la cathode. Or, ce point brillant se meut rapidement sur la surface de l'électrode négative. Si une température élevée était une condition nécessaire à l'ionisation, ce point brillant n'aurait aucune tendance à aller d'un endroit extrêmement chaud à la partie froide de la surface du mercure. Si l'on rend fixe ce point lumineux à l'aide d'un fil de platine, on ne constate pas une haute température en cet endroit. Du reste, la faible lumière émise par la surface adjacente au fil de platine, en particulier lorsque le courant n'est pas très intense, est plutôt une lumière phosphorescente qu'une lumière due à l'incandescence que produirait une température élevée.

Enfin, si l'on refroidit la cathode, on n'apporte aucune modification ni à la surface lumineuse, ni à l'arc. Prenons encore un tube de verre portant une *anode de mercure* et une cathode constituée par une coupe de platine. Si nous chauffons le mercure, la vapeur de ce métal vient se déposer en une couche mince sur la coupe de platine qui joue alors le rôle d'une cathode de mercure. Si nous refroidissons cette coupe au moyen d'une circulation d'eau, le seul changement que nous observions est que le point lumineux se déplace avec une très grande vitesse sur la couche de mercure.

Si l'on emploie comme *cathode* une substance solide telle que le graphite, le fer, le platine, on constate, d'après la teinte de la place brillante, que celle-ci n'est pas à une très haute température, de telle sorte que la désagrégation est due surtout à des causes purement électriques.

Si la cathode est construite de façon qu'une partie possède une bien plus grande résistance que le reste, et si on la chauffe à l'aide d'un courant auxiliaire, la partie la plus résistante se trouve portée à une température élevée, et l'on constate pourtant que la lueur se déplace sans préférence pour cette surface chaude, contrairement à ce que l'on aurait présumé si l'ionisation était produite par une haute température.

L'élévation de la température de la cathode est une conséquence de l'ionisation et non la cause de ce phénomène.

M. Weintraub conclut que ces diverses considérations ne démontrent pas qu'une température élevée est sans influence sur l'ionisation, fait qui, au contraire, est bien établi dans d'autres cas, mais que pour l'arc dans une vapeur métallique la température de la cathode semble ne pas être l'agent ionisant.

IV. — Régulation des lampes à vapeur de mercure.

Nous avons indiqué précédemment que l'on est parvenu à limiter les variations de la pression de la vapeur de mercure en donnant aux surfaces condensantes des dimensions convenables.

Nous avons vu que la résistance de la colonne de vapeur de mercure, pour une pression donnée, diminue lorsque le courant augmente, et réciproquement, de telle sorte que, si la lampe était seule en circuit, une légère variation de la tension du réseau pourrait produire une variation considérable du courant et même désamorcer la lampe. Celle-ci serait donc exposée à s'éteindre spontanément et même à ne pas s'allumer.

On peut éviter ces inconvénients en montant une résistance en série avec la lampe. Dans ces conditions, si la tension du réseau vient à baisser, ou encore si la température s'élève, déterminant une augmentation de la résistance de la

vapeur de mercure, le courant diminue. La chute de tension dans la résistance additionnelle devient donc plus faible et, par suite, tend à rendre la différence de potentiel aux électrodes plus constante.

D'autre part, le courant traversant un gaz raréfié sous l'action d'une force électromotrice continue, même constante, éprouve des variations d'intensité brusques, trop rapides pour que l'ampèremètre puisse les indiquer. Pour rendre le fonctionnement de la lampe régulier, il faudrait monter en série avec elle une résistance très grande qui réduirait considérablement le rendement. M. Cooper Hewitt a évité cet inconvénient en montant en série avec la lampe une bobine d'inductance qui amortit les variations brusques de courant, ainsi qu'une résistance ohmique pour l'ajustage et la régulation du courant.

Si deux lampes doivent fonctionner en série, chacune d'elles est munie d'un shunt qui est coupé automatiquement par un petit interrupteur magnétique, lorsque le noyau de la bobine d'inductance se trouve aimanté par le courant de la lampe correspondante.

Suivant M. v. Recklinghausen, une lampe Cooper Hewitt à tube de 19^{mm} de diamètre, établie pour fonctionner en série, avec une lampe identique, sur un réseau à 110 volts, possède son rendement maximum pour un courant voisin de 3,5 ampères et une tension aux électrodes d'environ 38 volts. Pour une lampe seule sur 110 volts, la tension aux électrodes doit être de 75 à 80 volts; pour obtenir un fonctionnement stable et régulier, il faut donc absorber dans ce cas 30 à 35 volts dans l'appareil régulateur.

V. — Couleur de l'arc mercuriel.

L'arc mercuriel a une couleur bleu verdâtre due au manque de rayons rouges et orangés dans le spectre du mercure.

Une étude approfondie a montré que la fatigue de la vue, que l'on éprouve après un travail prolongé avec un éclairage artificiel, est due moins à la plus faible intensité de cet éclairage par rapport à la lumière du jour, qu'aux rayons rouges et orangés qui prédominent dans les lumières artifi-

cielles. Si l'on supprime les rayons rouges et orangés on fait disparaître ces effets nuisibles.

Grâce à ce manque de rayons rouges et à son faible éclat intrinsèque, l'arc à vapeur de mercure ne fatigue pas la vue. Il convient particulièrement à l'éclairage des bureaux, des salles de dessin, des usines. Il est encore spécialement indiqué pour l'éclairage des voies suburbaines, des jardins, des serres, où le vert est la couleur prédominante.

La lumière Auer à incandescence par le gaz, dans laquelle la teinte verdâtre est due à un excès de rayons verts superposés à un excès de rayons rouges et orangés, ne possède pas la même innocuité.

La lumière de l'arc mercuriel est riche en rayons actiniques. Elle convient donc à la photographie, à la photogravure, à la reproduction des dessins sur bleus.

Mais, dans l'état actuel, l'arc à vapeur de mercure a un champ restreint d'applications. Il donne aux objets rouges une teinte violacée; les visages prennent un aspect quelque peu macabre. Pour l'éclairage intérieur, il ne convient qu'à la condition qu'on lui ajoute des rayons rouges et orangés. Mais alors le rendement lumineux se trouve diminué du fait du rendement propre inférieur des lumières rouge et orangée.

La *General Electric Company* avait exposé à Saint-Louis, en 1904, des lampes à vapeur de mercure ayant un tube de verre de 19^{mm} de diamètre intérieur et de 406^{mm} de longueur, à cathode de mercure et à anode de graphite artificiel. Elles absorbaient chacune 3,5 ampères et 32,5 volts, et étaient montées deux par deux en série sur le réseau à 125 volts. La différence $125 - 65 = 60$ volts était absorbée par deux résistances en série avec les tubes et formées chacune de 3 lampes à incandescence à filament de carbone en quantité, disposées tout autour du tube à vapeur de mercure vertical, à l'intérieur d'un globe opale, de forme ovoïde allongée. Ces lampes donnent, par leur résistance, de la stabilité à l'arc mercuriel et lui fournissent les rayons rouges qui lui font défaut.

On a cherché à introduire des rayons rouges à l'aide de la fluorescence, c'est-à-dire par transformation de quelques-unes

des longueurs d'onde de la vapeur de mercure, en longueurs d'onde rouges. La soie imprégnée de rhodamine convient très bien à la production de cet effet, mais elle donne lieu à une perte de flux lumineux d'environ 25 pour 100.

On a essayé de modifier la teinte de l'arc mercuriel par l'adjonction de vapeurs de métaux alcalins, en particulier le lithium, qui donne des rayons rouges; mais ces métaux attaquent le verre. La *General Electric Company* a employé des iodures alcalins : iodure de lithium anhydre pour la couleur rouge, iodure de sodium pour le jaune, mélange d'iodures de lithium et de sodium pour la lumière blanche, iodure d'indium pour la lumière bleue.

M. Cooper Hewitt a tenté de colorer l'arc mercuriel en introduisant dans le tube une petite quantité de certains gaz, tels que l'azote, donnant des rayons rouges, l'hydrogène, des rayons violets.

M. v. Recklinghausen, en expérimentant sur de grandes ampoules sphériques à raréfaction extrêmement élevée, fonctionnant avec des courants même supérieurs à 100 ampères, et refroidies fortement de façon que la vapeur de mercure produite se condense immédiatement, a constaté que l'on n'aperçoit à l'intérieur qu'un léger nuage gris bleuté flottant à la surface de la cathode de mercure. Ce petit nuage lumineux, qui est constitué par la partie pulvérisée du mercure, a pour ces grandes intensités une surface de près de 1^{cm^2}, de forme irrégulière, et se déplace sur la surface de la cathode. Le reste de la masse gazeuse est obscur.

Si la raréfaction est poussée moins loin, et si l'appareil est toujours refroidi, l'intérieur s'illumine et la couleur de la lumière est caractéristique du gaz qu'il renferme.

M. v. Recklinghausen a introduit un peu d'azote dans un tube à cathode de mercure qu'il a plongé dans de la glace : le courant l'illuminait en rose. Lorsqu'on retirait la glace, la vapeur de mercure envahissait le tube et la lumière devenait bleu verdâtre. Le spectre de l'azote, ou bien celui du mercure, était toujours prépondérant.

M. v. Recklinghausen a ensuite substitué au mercure un amalgame de potassium, dans un tube de 1^m de longueur. Lorsque le courant passait, la partie supérieure du tube s'il-

luminait en rouge et la partie inférieure en vert. Le changement de teinte se produisait sur une longueur d'environ 2^{cm}. La couleur verte dans la partie adjacente à la cathode est due à la vapeur de mercure qui, vers le milieu du tube, se trouve condensée en quantité suffisante pour que ce soit le spectre du potassium qui prédomine dans le haut du tube.

Comme dans la pratique on ne peut pas refroidir le tube suffisamment pour réduire la pression de la vapeur de mercure à une très faible valeur, la lampe fournit toujours le spectre du mercure.

VI. — Rendement. Intensité lumineuse. Vie.

La détermination de l'intensité lumineuse d'une lampe à vapeur de mercure présente des difficultés en raison de la couleur spéciale de la lumière. La consommation spécifique accusée est de 0,55 à 0,64 watt par bougie, y compris les pertes dans l'appareil régulateur. Comme nous l'avons vu d'autre part, ces lampes étant établies pour un courant de 3,5 ampères, elles ont toujours une grande intensité lumineuse pour les tensions usuelles.

Les lampes Cooper Hewitt, à courant continu, installées en 1905, sont de deux types :

1° La lampe H, de 300 candles, que l'on monte en général par groupe de deux en série sur 98 à 122 volts, ou par groupe de quatre en série sur 196 à 244 volts. Elles sont munies chacune d'une résistance en shunt qui permet de faire fonctionner une seule lampe d'un groupe de deux. Elles absorbent un courant de 3,5 ampères. Deux lampes en série sur 110 volts consomment 385 watts.

2° La lampe K, de 700 candles, que l'on monte seule sur 110 volts ou par groupe de deux en série sur 220 volts. Cette lampe absorbe un courant de 3,5 ampères et consomme 385 watts à 110 volts.

La consommation spécifique de ces deux lampes à courant continu est de 0,55 watt par candle.

En 1906, a été établie la lampe à courant alternatif type C, de 425 candles, consommant 275 watts à 110 volts. Elle se

monte seule sur 110 volts ou par deux en série sur 220 volts. La consommation spécifique est de 0,64 watt par candle.

La lampe à courant alternatif est analogue à celle à courant continu, mais elle porte à l'opposé de la cathode de mercure deux anodes de fer. Celles-ci sont connectées aux extrémités de l'enroulement d'un auto-transformateur dont le milieu est relié à la cathode de mercure par l'intermédiaire d'une bobine d'inductance et d'une résistance de réglage, les conducteurs d'amenée du courant alternatif alimentant cet enroulement en deux points convenablement choisis, dépendant de la tension du réseau.

Pour supprimer le papillotage il faut adopter une bobine d'inductance d'autant plus puissante que la fréquence est moins élevée.

Suivant M. v. Recklinghausen, l'intensité lumineuse d'une lampe Cooper Hewitt baisse de 20 pour 100 pendant les 100 premières heures de fonctionnement par suite d'une altération de la surface du verre, puis elle reste constante.

La Compagnie Westinghouse indique pour les lampes Cooper Hewitt une durée minimum de 1000 heures.

VII. — Lampe en verre de quartz.

Le verre ordinaire absorbe les rayons ultra-violets, tandis que le verre de quartz, ou cristal de roche fondu, les laisse passer.

Le quartz fond à 1800° C., soit à environ 800° de plus que le verre ordinaire. La fusion s'obtient au moyen du chalumeau oxhydrique. Il n'est pas sensible aux variations brusques de température. Il laisse passer les ondes jusqu'à celles de $0^{\mu},220$ de longueur.

Les radiations ultra-violettes étant émises en abondance par la lampe au verre de quartz produisent une ozonisation considérable de l'air ambiant et exercent une forte action dissipatrice sur les charges négatives. La lumière a une action physiologique énergique qui s'arrête à la peau et qui exige que l'on prenne quelques précautions dans le maniement de

la lampe. Elle possède des propriétés photogéniques accentuées. Elle produit des effets d'ionisation et de fluorescence.

VIII. — Redresseur a vapeur de mercure.

Nous avons vu qu'on peut amorcer un tube à vapeur de mercure à l'aide d'une tension élevée et qu'il est nécessaire que l'ionisation de la cathode soit entretenue pour que l'arc se maintienne. Si l'on fait agir entre les électrodes une force électromotrice alternative dont la valeur maximum soit modérée, et si, par un procédé quelconque, on amorce l'arc sur une demi-onde, au premier changement de polarité l'ionisation de la cathode disparaît et, la demi-onde suivante de force électromotrice étant incapable de produire le phénomène d'ionisation à la surface du mercure, l'appareil se trouve désamorcé.

M. Steinmetz indique 9000 volts comme tension minimum nécessaire pour maintenir un courant alternatif dans les deux sens dans la vapeur de mercure. Entre 6000 et 9000 volts, l'une des demi-ondes est supprimée et le courant devient redressé. Le sens du courant dépend de la demi-période pendant laquelle l'arc a été amorcé, mais ensuite le sens reste invariable.

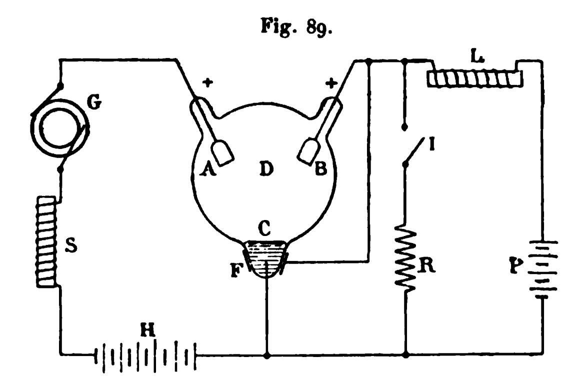
M. Cooper Hewitt a construit un interrupteur à vapeur de mercure pour courant alternatif. L'appareil se compose en principe d'un tube de verre en U renversé contenant du mercure dans les deux branches, que l'on intercale dans le circuit à couper.

Quand l'appareil est dans la position verticale, un pont de mercure fait communiquer les deux branches de l'U et le circuit est fermé. Si l'on incline le tube, le pont de mercure se rompt, et le courant est coupé dès que la tension tombe à la valeur de quelques volts, puis ne se réamorce pas lorsque la force électromotrice change de signe.

Cet interrupteur permet de couper de grandes intensités et des tensions de plusieurs milliers de volts.

La figure 89 représente le schéma d'un dispositif permettant de redresser un courant alternatif de tension modérée.

Fig. 89.



G est la génératrice à courant alternatif ou le secondaire d'un transformateur fournissant le courant qu'il s'agit de redresser et dont l'une des bornes est connectée à l'électrode de fer ou de charbon A. Le circuit H, une batterie d'accumulateurs par exemple, dans lequel doit circuler le courant redressé, est intercalé entre la seconde borne de G et l'électrode de mercure C du ballon de verre D dans lequel on a fait un vide très élevé. Une troisième électrode B, de fer ou de charbon, est reliée au pôle positif d'une source de courant continu P dont le pôle négatif est connecté à l'électrode de mercure C. Un dispositif identique à celui de la figure 84, et comprenant une bobine d'inductance L, un shunt R avec interrupteur à huile I, ainsi qu'un manchon d'étain F entourant la cathode C, permet d'amorcer et de maintenir un courant continu entre l'anode B et la cathode C, pourvu que la source P donne une tension d'au moins 14 volts et soit capable de fournir un courant d'environ 3,5 ampères.

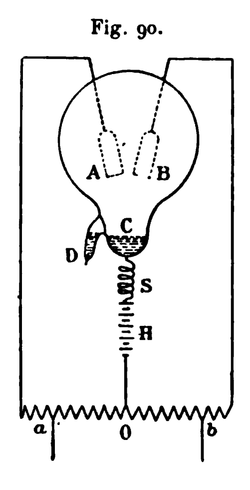
Chaque fois que la force électromotrice alternative tendra à faire passer un courant de A à C, celui-ci passera effectivement, pourvu que la tension soit d'au moins 14 volts. Au contraire, lorsque le sens de la force électromotrice alternative sera tel que celle-ci tende à lancer le courant de C à A, le courant ne pourra pas passer, A étant alors cathode non désagrégée. Le circuit AGHC sera donc le siège d'un courant

de sens constant. La bobine d'inductance S rend le courant redressé moins variable.

Ce dispositif permet de redresser seulement la moitié des demi-ondes alternatives.

M. Cooper Hewitt a obtenu la rectification des deux demi-ondes par son convertisseur représenté schématiquement sur la figure 90. Cet appareil se compose d'une ampoule de verre

Fig. 90.



d'environ 22^{cm} de diamètre, munie de deux anodes de fer A, B logées dans deux manchons de verre soudés à l'ampoule, et d'une cathode de mercure. Les deux anodes A, B sont connectées aux bornes de l'enroulement secondaire d'un transformateur. Si la tension nécessaire n'est pas très différente de celle du réseau, le transformateur peut avoir un enroulement unique dont on connecte à la canalisation deux points *a*, *b* convenablement choisis. Le circuit à courant redressé est relié à la cathode C et au milieu O de l'enroulement.

Une bobine d'inductance S permet de régler la tension et l'intensité du courant redressé; mais son rôle principal est d'empêcher le courant de s'annuler de façon que la désagrégation de la cathode persiste lorsque la force électromotrice alternative passe par zéro. Cette bobine a encore comme effet de réduire l'amplitude de la variation du courant redressé.

L'amorçage du convertisseur s'effectue d'une manière très simple, lorsque l'appareil est destiné à charger une batterie d'accumulateurs, à l'aide d'une électrode auxiliaire D de mercure, reliée à une borne de la batterie H. L'ampoule, montée sur couteaux, peut basculer autour d'un diamètre. Avant l'amorçage elle se trouve dans une position inclinée telle que les deux masses de mercure C et D se trouvent réunies. Lorsqu'on ferme les interrupteurs, un électro-aimant à plongeur fait basculer l'ampoule, par l'intermédiaire d'une bielle, de façon à amener son axe suivant la verticale, mouvement qui détermine la rupture du pont entre les électrodes C et D. Le petit arc qui en résulte amorce l'appareil. Un interrupteur automatique commandé par le courant principal coupe alors le circuit d'amorçage.

Si la tension alternative venait à diminuer notablement, l'appareil pourrait se désamorcer; mais il se réamorcerait automatiquement dès que la tension aurait repris une valeur suffisante.

En aucun cas la batterie ne peut se décharger dans le convertisseur. Afin de réduire les pertes au minimum on donne au trajet gazeux la plus faible longueur possible.

Les dimensions de l'appareil complet, y compris le transformateur, la bobine d'inductance, un ampèremètre, un voltmètre, un interrupteur pour le courant alternatif et un interrupteur pour le courant redressé, sont : 40^{cm} de largeur, 60^{cm} de longueur et 70^{cm} de hauteur.

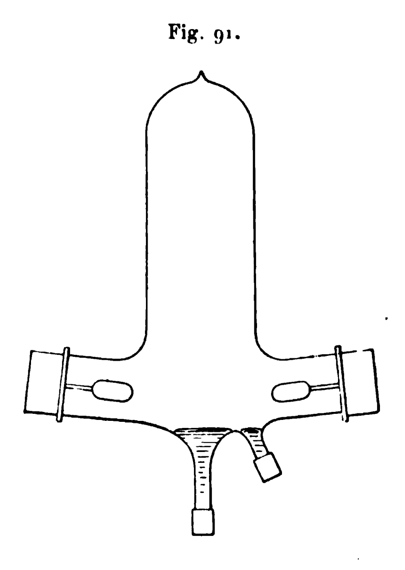
Ce convertisseur convient pour les fréquences de 25 à 150 périodes par seconde. Le courant redressé est de 6 à 30 ampères et sa tension normale de 80 à 115 volts. Les valeurs extrêmes de la tension du courant redressé peuvent être inférieures à 80 volts et atteindre 240 volts. Pour des forces électromotrices alternatives supérieures à 450 volts le transformateur porte deux enroulements séparés.

La perte de puissance dans le convertisseur même est proportionnelle au courant. Quelle que soit l'intensité, le convertisseur consomme intérieurement une force électromotrice constante d'environ 15 volts. Le rendement du redresseur proprement dit, pour une tension donnée, est donc constant à toutes charges. Mais il faut tenir compte des pertes dans le transformateur, dans la bobine d'induc-

tance, etc., de telle sorte que pour une tension redressée de 115 volts le rendement total de l'appareil est de 80 pour 100.

Le redresseur à vapeur de mercure exposé par la *General Electric Company* à Saint-Louis en 1904 est tout à fait analogue au précédent. Les deux anodes, de graphite, sont disposées à la base d'un réservoir de verre formant condenseur (*fig.* 91). L'amorçage s'effectue comme dans l'appareil Cooper

Fig. 91.



Hewitt. L'enroulement unique du transformateur fournissant le courant alternatif est relié en plusieurs points aux plots de deux cadrans qui permettent d'obtenir la tension désirée.

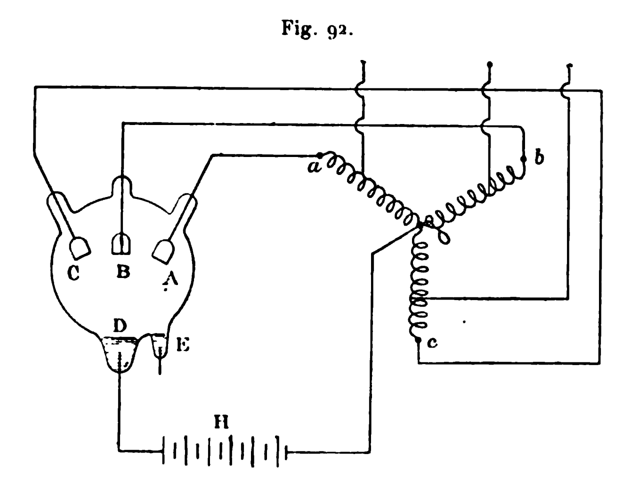
Ce redresseur fonctionnait sur un réseau à 220 volts, 60 périodes par seconde, et fournissait un courant redressé de 10 ampères à 70 volts. Le rendement total était de 75 pour 100.

Enfin, la figure 92 représente le dispositif imaginé par M. Cooper Hewitt pour redresser un courant triphasé.

L'ampoule est munie de trois anodes de fer A, B, C et d'une cathode de mercure D. Les anodes A, B, C sont reliées respectivement aux trois bornes de l'enroulement secondaire

en étoile d'un transformateur à courant triphasé. Le circuit à courant redressé est connecté, d'une part, à la cathode D et, d'autre part, au centre O de l'étoile secondaire. Le transformateur peut du reste, comme l'indique la figure 92,

Fig. 92.



porter un enroulement unique dont trois points convenablement choisis sont connectés au réseau à courant triphasé.

L'amorçage est obtenu, comme dans le redresseur à courant alternatif, à l'aide d'une électrode auxiliaire E empruntant son courant à la batterie d'accumulateurs. Les courants débités par les trois anodes A, B, C ne s'annulent jamais tous simultanément et la cathode est ainsi maintenue constamment à l'état de désagrégation. Une bobine d'inductance dans le circuit à courant redressé est donc inutile dans ce cas.

Le redresseur à vapeur de mercure a reçu une application importante dans l'éclairage public de la ville de Portland, Oregon, au moyen de lampes à arc à magnétite.

Ces lampes, qui absorbent un courant redressé de 4 ampères à la tension de 80 volts, soit 320 watts, sont montées par groupes de 75 en série.

La puissance est transmise sous forme de courant triphasé à 10000 volts, à la fréquence de 33 périodes par seconde, et

est distribuée à des transformateurs à courant alternatif simple fournissant au secondaire un courant constant à la tension de 16000 volts.

Les extrémités de l'enroulement secondaire sont reliées aux deux anodes du tube redresseur, tandis que le circuit de 75 lampes est monté entre la cathode de mercure et le milieu de cet enroulement. Sur chaque conducteur amenant le courant alternatif à une anode est intercalée une bobine d'inductance. Une troisième bobine est montée sur le circuit à courant redressé.

La tension du courant redressé est de $80 \times 75 = 6000$ volts.

Un tube redresseur de 30 kilowatts environ donne lieu à une perte de tension constante de 25 volts correspondant à une perte de puissance de 100 watts. Le rendement total du redresseur avec son transformateur et ses bobines d'inductance est :

A une surcharge de 10 pour 100.....	89	pour 100.
A pleine charge....................	88	—
A trois quarts de charge...........	85	—
A demi-charge......................	81	—
A quart de charge..................	80	—

Le tube est refroidi par un petit ventilateur mû par un moteur dont la consommation n'est pas comptée dans les rendements ci-dessus.

La vie moyenne d'un tube redresseur et de 650 heures.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE I.

PRINCIPES GÉNÉRAUX.



CHAPITRE II.

HISTORIQUE.

CHAPITRE III.

LAMPE A FILAMENT DE CARBONE.

